

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra neželezných kovů, rafinace a recyklace

# Bakalářská práce

Vlastnosti niklových slitin

Properties of nickel alloys

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství  
Katedra neželezných kovů, rafinace a recyklace

## Zadání bakalářské práce

Student: **Pavel Kohut**

Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911R029 Neželezné kovy a speciální slitiny

Téma: Vlastnosti niklových slitin  
Properties of nickel alloys

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární rešerše se zaměřením na:
  - základní charakteristiku
  - třídění niklových slitin
  - technologii přípravy Ni slitin, směrovou krystalizaci.
2. Experimentální část
  - příprava vzorků na hodnocení strukturních a mikrostrukturních charakteristik
  - vyhodnocení vybraných charakteristik

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] KURSA, M. Technologické a fyzikálně metalurgické charakteristiky intermetalické sloučeniny Ni3Al. In Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava, č. 1, rok 2000, ročník XLVI, řada hutnická, s. 1-122.
- [2] HERNAS, A., JONŠTA, Z. et al. Žárupevné oceli a slitiny. Žilina, 2002, 392 s.
- [3] KUCHAR, L., DRÁPALA, J. Metalurgie čistých kovů. Metody rafinace čistých látek. Nadácia R. Kammela, Košice, 2000, s. 63.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

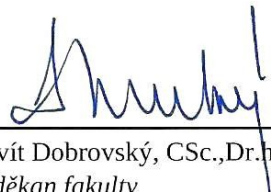
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jitka Malcharcziková, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013

  
prof. Ing. Miroslav Kursá, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.  
děkan fakulty

# **Zásady pro vypracování bakalářské práce**

## **I.**

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## **II.**

### **Uspořádání bakalářské práce:**

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list                              | 5. Obsah BP                  |
| 2. Zásady pro vypracování BP                 | 6. Textová část BP           |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy                   |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

### IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2011/2012.

Ostrava 30. 11. 2011

  
**Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.**  
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava



# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě 29. 4. 2013.....

.....Radek Petr.....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## Poděkování

Děkuji paní Ing. Jitce Malcharczikové, Ph.D. za poskytnuté rady, podněty a za celkové vedení bakalářské práce.

Rovněž děkuji panu Ing. Martinu Pohludkovi za pomoc s přípravou experimentálních vzorků pro mou práci.

Tato práce byla řešena v rámci projektu TA 01011128 “Výzkum a vývoj technologie odstředivého lití intermetalických sloučenin na bázi Ni”. Při řešení práce bylo využito zařízení pořízené v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/01.0040 “Regionální materiálově technologické výzkumné centrum”.

## Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na významnou skupinu materiálů, nesoucí název niklové superslitiny. V práci je uveden základní přehled, třídění, a možnosti použití niklových superslitin v praxi. Značná část práce je věnována speciální skupině niklových slitin, zvané aluminidy niklu. Tyto intermetalické fáze na bázi  $\text{Ni}_3\text{Al}$  jsou v popředí zájmu mnoha světových korporací a v této oblasti byly prováděny četné experimenty na posílení jejich, už tak vysokých, mechanických vlastností. Práce poskytuje srovnání niklových aluminidů s komerčně používanými slitinami a poukazuje na konkurenceschopnost niklových aluminidů v porovnání s mnohými niklovými superslitinami. Celkové vlastnosti niklových aluminidů lze ovlivnit procesem směrové krystalizace Bridgmanovou metodou, která je v práci také popsána. V praktické části jsou porovnány jednotlivé typy struktur v litém stavu a ve stavu po směrové krystalizaci.

**Klíčová slova:** niklové superslitiny, aluminidy niklu,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , směrová krystalizace, Bridgmanova metoda

## Annotation

This Bachelor thesis deals with an outstanding group of materials which are called nickel superalloys. The work gives a basic survey, classification, and disposal possibilities of nickel superalloys in practice. The considerable part of the work is devoted to a special group of nickel alloys named nickel aluminides. These Intermetallics phases based on  $\text{Ni}_3\text{Al}$  are in the limelight of many world corporations and numerous experiments have been carried out to fortify their already high mechanical properties. The work compares nickel aluminides with commercially used alloys and refers to the competitiveness of nickel aluminides in comparison with many nickel superalloys. Overall properties of nickel aluminides can be influenced by the process of directional crystallization with Bridgman method which is also described in this work. In practical part, particular types of structures in cast state are compared with the state after directional crystallization.

**Key words:** nickel superalloys, nickel aluminides,  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , directional solidification, Bridgman method

## Seznam použitých značek, veličin a jejich jednotek

<u>Značka</u>	<u>Jednotka</u>	<u>Veličina (význam)</u>
A	[%]	tažnost
A <sub>5</sub>	[%]	tažnost krátká zkušební tyč
at. %	[%]	atomární procenta
HB	[1]	tvrdost dle Brinella
hm. %	[%]	hmotnostní procenta
HRB	[1]	tvrdost dle Rockwella s použitím kuličky jako indentoru
HU		slitina FeNiCr
HV 0,05	[1]	mikrotvrdost dle Vickerse
IC	-	intermetalická sloučenina (intermetallic compound)
IN	-	Inconel
KPC (fcc)	-	kubická plošně centrovaná mřížka
Ni <sub>3</sub> Al	-	intermetalická sloučenina, aluminid niklu
ORNL	-	Oak Ridge National Laboratory
R <sub>e</sub>	[MPa]	mez kluzu
R <sub>m</sub>	[MPa]	mez pevnosti v tahu
R <sub>p0,2</sub>	[MPa]	mez kluzu při 0,2 % plastické deformaci (smluvní mez kluzu)



## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Nikl.....	2
2.1. Fyzikální a chemické vlastnosti.....	2
2.2. Mechanické vlastnosti.....	3
3. Slitiny niklu.....	4
3.1. Korozi-vzdorné slitiny.....	6
3.2. Žárupevné slitiny.....	7
3.2.1. Vliv prvků obsažených v superslitinách.....	11
3.3. Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi.....	12
4. Intermetalické sloučeniny, niklové aluminidy.....	12
4.1. Intermetalické sloučeniny s fází $\text{Ni}_3\text{Al}$ .....	13
4.2. Mechanické vlastnosti slitin $\text{Ni}_3\text{Al}$ .....	14
5. Příklady použití niklových slitin a niklových aluminidů $\text{Ni}_3\text{Al}$ .....	19
6. Vakuové tavení a odlévání, proces Exomelt™.....	21
7. Směrová krystalizace.....	22
8. Cíle práce.....	24
9. Praktická část.....	25
9.1. Příprava vzorků.....	25
9.2. Metalografie – příprava.....	26
9.3. Hodnocení struktury.....	28
9.4. Mikrotvrdost, pórovitost.....	36
10. Závěr.....	38
11. Seznam použité literatury.....	39

# 1. Úvod

Dnešní doba je charakterizována vyspělou moderní společností, která vyžaduje pokrok v technickém světě. Bez technických zařízení a významných konstrukčních prvků by dnešní společnost nemohla být na tak vyspělé úrovni, v jaké se nyní nachází. Průřezem historií nacházíme mnohá významná jména a data spojená s objevy a vynálezy, která dnes neodmyslitelně patří ke každodennímu životu. Avšak mnohá z těchto zařízení již neodpovídají požadavkům dnešní společnosti, a proto je třeba hledat zařízení nová, případně je třeba pracovat na zdokonalení stávajících zařízení.

Když se pozastavíme u zrodu kteréhokoliv technologického zařízení, nacházíme klíčový prvek, který všechna zařízení bez výjimky spojuje. Onen klíčový prvek je základní materiál, z něhož je zařízení vyrobeno. Každá součástka je vytvořena z určitého druhu materiálu, který musí splňovat základní materiálové charakteristiky tak, aby byla zaručena jeho funkčnost. Velkou přízeň si získaly kovové materiály, z důvodu jejich rozmanitých a nenahraditelných vlastností, které dodnes nebyly plně využity a prozkoumány.

Touha po výzkumu vlastností, struktur a stavby kovových materiálů, vedla k velkému rozvoji materiálového a metalurgického inženýrství. Právě s pomocí materiálového a metalurgického inženýrství se rodí nové druhy materiálů, které se snaží svými vlastnostmi přiblížit k takřka nezničitelným materiálům. Toho lze dosáhnout především vytvářením slitin kovů s vhodným poměrem složení. Mnohé dříve vytvořené materiály nejsou schopny odolávat vysoké zátěži ve strojních konstrukcích, avšak řešení bylo nalezeno ve skupině vysoce odolných slitin nazývaných superslitiny.

Kovy a materiály můžeme obecně hodnotit po stránce fyzikální, chemické, mechanické, případně technologické. Z těchto vlastností můžeme určit základní povahu a vlastnosti kovu.

Niklové slitiny zaznamenaly v posledních letech výrazný vývoj a posun vpřed, zejména v oblasti nazývané niklové superslitiny, z důvodu jejich výjimečných mechanických vlastností. Práce bude zaměřena především na skupinu slitin nazývanou Inconely, vybrané niklové slitiny na bázi  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , jejich mechanické vlastnosti a na metody přípravy těchto slitin. Praktická část bude rovněž zaměřena na vybrané vzorky niklových slitin na bázi  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , které byly vakuově odlity a rafinačně zpracovány směrovou krystalizací. Následně byla porovnána litá a směrově krystalovaná struktura, včetně vyhodnocení mikrotvrdosti a pórovitosti.

## 2. Nikl

Nikl byl objeven německým chemikem A. F. Crondstedtem roku 1751 při pokusech o izolaci mědi z rudy. První čistý nikl byl připraven roku 1775 chemikem T. Bergmanem. V zemské kůře se nikl nachází ve značném množství. Nejdůležitější rudy jsou například millerit (NiS) a nikelin (NiAs). Největší naleziště Sudbury se nachází v Kanadě v provincii Ontario (až  $\frac{1}{4}$  všech světových zásob). Další naleziště se nacházejí v Rusku, na Nové Kaledonii, Austrálii, Kubě a Indonésii. Nikl se získává pražením rudy v konvertorech a přečišťováním elektrolytickou rafinací [1].

### 2.1. Fyzikální a chemické vlastnosti

Nikl patří mezi feromagnetické kovy a magnetičnost ztrácí při  $357^{\circ}\text{C}$ , tato hodnota se označuje jako Curieho bod. Hustota niklu je  $8,90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , teplota tání  $1455^{\circ}\text{C}$  a bod varu je  $2913^{\circ}\text{C}$  [1]. Nikl je neušlechtilý kov a má kubickou plošně centrovanou mřížku [2]. Tepelná vodivost při  $20^{\circ}\text{C}$  je  $70,3\text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$  a elektrická vodivost při  $20^{\circ}\text{C}$  je  $0,096\text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$  [3]. Přehled fyzikálních vlastností niklu je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Přehled fyzikálních vlastností niklu [1,2,3]

Protonové číslo	28
Relativní atomová hmotnost	58,69
Struktura při $20^{\circ}\text{C}$	KPC (fcc)
Hustota při $20^{\circ}\text{C}$ [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	8,908
Teplota tání [ $^{\circ}\text{C}$ ]	1455
Teplota varu [ $^{\circ}\text{C}$ ]	2913
Standardní potenciál (V)	- 0,257
Tepelná vodivost při $20^{\circ}\text{C}$ [ $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ]*	70,3
Elektrický odpor při $20^{\circ}\text{C}$ [ $\mu\Omega\cdot\text{m}$ ]*	0,096

\* Hodnoty udávané pro NICKEL 200 ve vyžíhaném stavu

NICKEL 200, 201 a 205 je technický nikl o čistotě 1N7 až 2N a s limitovaným obsahem uhlíku do 0,15%. Toto označení bylo stanoveno největším americkým producentem niklových slitin, společností Special Metals Group. Nejvyšší typ technického niklu je NICKEL 270 s čistotou 3N a s maximálním obsahem uhlíku 0,02% [4].

Z chemického hlediska je NICKEL 200 velmi odolným materiálem. Je odolný vůči mnoha korozním prostředím. Lze použít v prostředí s redukční atmosférou a také s oxidační atmosférou, jelikož se na jeho povrchu vytváří pasivující vrstva oxidů. Je odolný vůči žíravým látkám a odolává korozi v mořském prostředí. Disponuje rovněž výbornou odolností

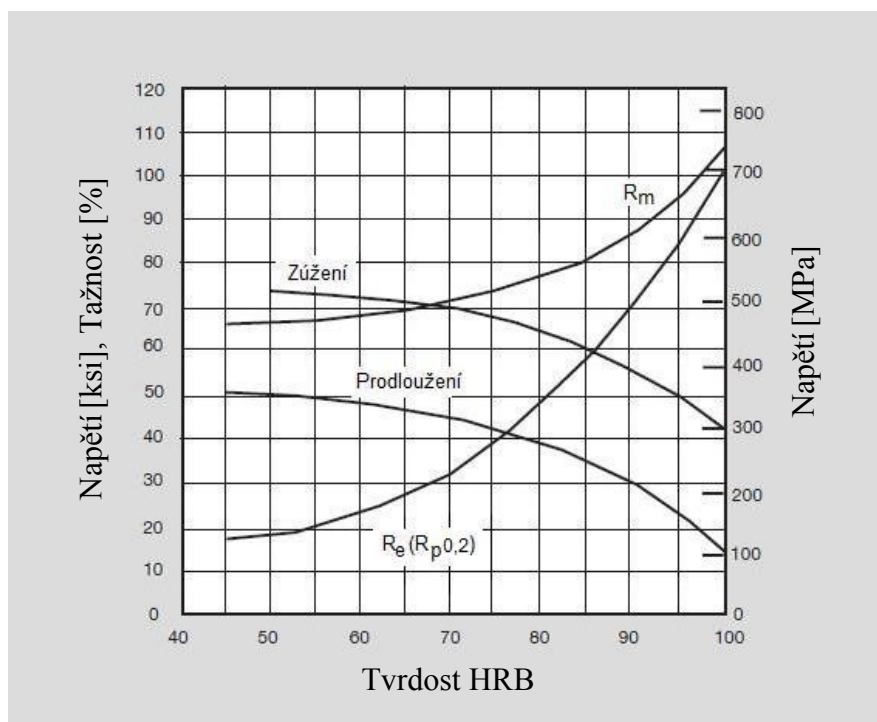
vůči NaOH a dalším alkalickým sloučeninám. Je také odolný vůči koroznímu praskání pod napětím vlivem chloridových solí. Dobrá je také odolnost vůči kyselinám a koroze v destilované vodě je téměř nulová [3].

## 2.2. Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti technického niklu označovaného NICKEL 200, pro tyče s různým způsobem zpracování, jsou uvedeny v tabulce 2 a závislost mechanických vlastností na tvrdosti je na obrázku 1. Dle společnosti Special Metals Group je hodnota Youngova modulu, pro NICKEL 200 za teploty 26°C, 205 GPa [3].

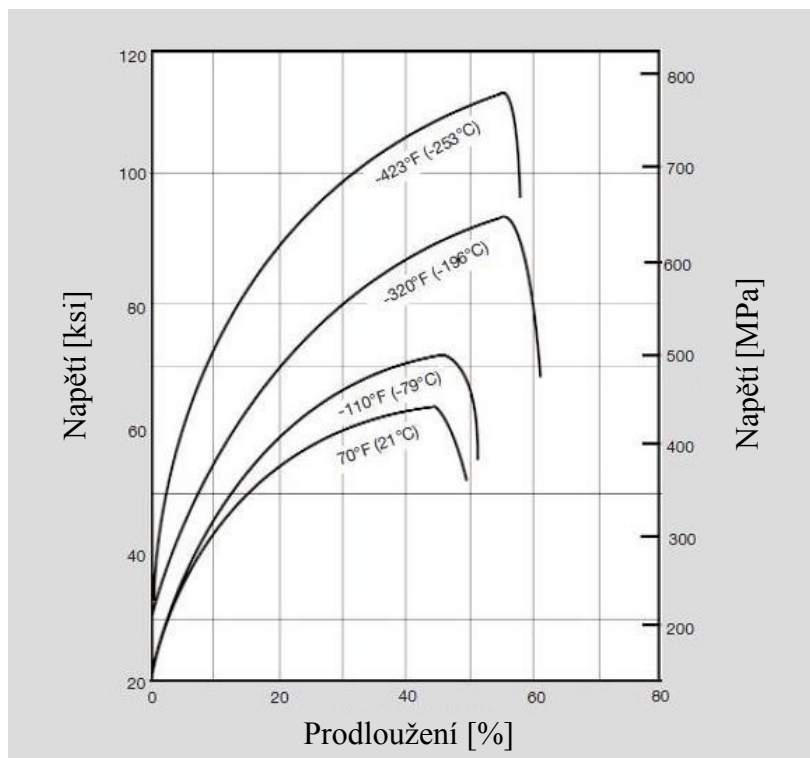
Tab. 2 Mechanické vlastnosti NICKELU 200 publikované společností Special Metals [3]

Stav (tyč)	$R_e (R_{p0,2})$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	Tažnost $A_5$ [%]	Tvrdost HB (3000 kg)	Tvrdost HRB
Vyrobena za tepla	105 – 310	415 – 585	55 – 35	90 – 150	45 – 80
Tažena za studena	275 – 690	450 – 760	35 – 10	140 – 230	75 – 98
Vyrobena za tepla + žhánána nebo tažena za studena + žhánána	105 – 210	380 – 520	55 – 40	90 – 120	45 – 70



Obr. 1 Závislost mechanických vlastností na tvrdosti pro NICKEL 200 [3]

Hodnoty mechanických vlastností niklu výrazně vzrůstají v závislosti na snižující se teplotě. Tahový diagram žíhané tyče z NICKELU 200, za pokojové teploty i za snížené teploty, je na obrázku 2 [3].



Obr. 2 Tahový diagram pro NICKEL 200, vyjadřující zvyšující se mechanické vlastnosti v závislosti na snižující se teplotě [3]

Vytvrzení niklu lze provést legováním 4,5% Al a 0,50% Ti (DURANICKEL 301) [4].

### 3. Slitiny niklu

Pro různá odvětví průmyslu se připravují slitiny niklu široké škály a různých vlastností. Nikl je prvek zajišťující metalurgickou stabilitu, zlepšuje svařitelnost a odolnost proti koroznímu praskání. Nejčastěji dochází k legování Cr, Mo, Fe a Cu až v řádech desítek procent. Tyto prvky zlepšují zejména: odolnost proti oxidaci za vyšších teplot, odolnost proti mezikrystalové a šterbinové korozi, odolnost vůči kyselinám a chloridům. Za účelem zvýšení pevnostních limitů slitin a za účelem vytvrzování se slitiny legují Al, Ti, Nb, W a Co v desetínách až jednotkách procent. Slitiny niklu se dělí na základě legujících prvků, případně podle jejich specifických vlastností. Používá se například dělení, největšího světového producenta niklových slitin, americké společnosti Special Metals Group, která rozlišuje čtyři hlavní skupiny niklu a jeho slitin, jimiž jsou: Technický nikl, MONELY, INCONELY a INCOLOYE [4]. Dělení je znázorněno na obrázku 3. Tato společnost vlastní ochranné známky INCONEL®, INCOLOY®, MONEL®, NILO®, NIMONIC®, UDIMET® [5].





Naproti tomu lze slitiny niklu kategorizovat komplexněji, a to dle jejich typických vlastností, dělením na slitiny korozi-vzdorné, žárupevné a slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi, které zahrnují i slitiny používané v elektrotechnice [1].

### 3.1. Korozi-vzdorné slitiny

Jsou rozděleny na slitiny Ni-Cu a Ni-Mo. Slitiny Ni-Cu se nazývají monely, přičemž prvky mají úplnou vzájemnou rozpustnost a vytváří tuhý roztok. Pokud dojde k legování hliníkem, slitiny lze vytvrzovat [1]. Mechanické vlastnosti monelů jsou závislé na způsobu tepelného zpracování. Jsou značně plastické, podobají se niklu, tudíž jsou málo pevné. Precipitační vytvrzování lze použít u slitiny MONEL K-500, která je navíc legována zhruba 3% hliníku a 0,5% titanu [4]. Používá se MONEL 400, chemické složení je uvedeno v tabulce 3, u něhož se nejlepších mechanických vlastností za pokojových teplot dosahuje tažením za studena s následným žíháním za účelem snížení pnutí. Mechanické vlastnosti slitiny jsou uvedeny v tabulce 4. MONEL 400 se používá v konstrukcích čerpadel, hřídelí a lodních šroubů, na elektrické a elektronické komponenty, pružiny, chemická zařízení například: nádrže na benzín, ropu, vodu, potrubí a ohříváče vody v kotlích, výměníky tepla a odvodušňovací zařízení. Podobnou slitinou je MONEL R-405, avšak s vyšším obsahem síry pro zlepšení obrobitelnosti, přičemž je tento monel schváleným materiálem na tlakové, nukleární nádoby a bojler [3].

Zajímavou slitinou je precipitačně vytvrzený MONEL K-500. Je vytvrzen pomocí příměsí Al a Ti, kdy vzniká fáze  $Ni_3(Al,Ti)$ . Složení monelu je uvedeno v tabulce 3. Vytvrzením dojde k výraznému zlepšení mechanických vlastností. Nejlepších hodnot mechanických vlastností MONELU K-500, za pokojových teplot, bylo dosaženo jeho vyrobením za tepla spolu se stárnutím, anebo tažením za studena s použitím stárnutí. Mechanické vlastnosti slitiny jsou uvedeny v tabulce 4. MONEL K-500 se používá na řetězy, kabely a díly pro námořní provoz, v medicíně na ostří nástrojů, škrabky zpracovávající buničinu, v ropném průmyslu na úchyty vrtacích hlav a nástroje, senzory a elektronické komponenty [3].

Slitina Ni-Mo se nazývá hasteloy. Tyto slitiny obsahují 26 – 32% molybdenu a používají se především v chemickém průmyslu, z důvodu jejich chemické odolnosti vůči kyselinám, s přídavkem chromu odolávají také pasivačnímu prostředí [1]. Příkladem mohou být slitiny Hastelloy S a Hastelloy X, složení slitin a mechanické vlastnosti jsou uvedeny rovněž v tabulkách 3 a 4 [6].

Tab. 3 Chemické složení vybraných korozivzdorných niklových slitin [3,6]

Slitina	Chemické složení [%]									
	Ni	Cu	Mo	Cr	Fe	C	Si	Mn	S	Jiné
					max.					
Monel 400	min. 63 (+Co)	28-34	-	-	2,5	0,30	0,2	2,0	0,024	-
Monel K-500	min. 63 (+Co)	27-33	-	-	2,0	0,25	0,5	1,5	0,010	2,3-3,15 Al, 0,35-0,85 Ti
Hastelloy S	67	-	15,5	15,5	1,0	0,02	-	-	-	0,20 Al, 0,02 La
Hastelloy X	49	-	9,0	22,0	15,8	0,15	-	-	-	2,0 Al, 0,6 W, max. 1,5 Co

Tab. 4 Mechanické vlastnosti, vzorků tyčí za pokojové teploty (21°C), vybraných korozivzdorných niklových slitin [3,6]

Slitina	$R_e (R_{p0,2})$ [MPa]		$R_m$ [MPa]	A [%]	Tvrdość HB (3000 kg)
Monel 400	379 – 690		579 – 827	40 – 22	160 – 225
Monel K-500	a)	690 – 1034	965 – 1310	30 – 20	265 – 346
	b)	655 – 1103	931 – 1276	30 – 15	255 – 370
Hastelloy S	455		845	49	-
Hastelloy X*	360		785	43	-

a) vyrobeno za tepla + provedení stárnutí

b) taženo za studena + provedení stárnutí

\* plochý vzorek

### 3.2. Žárupevné slitiny

Mají široké zastoupení. Základním legujícím prvkem je Cr, lze dolegovávat Fe, Mo, Ti, Al a dalšími prvky. Příměs chromu zvyšuje nejvíce žárovou odolnost a molybden zvyšuje korozní odolnost. Významnými legurami jsou titan a hliník, které tvoří intermetalickou fázi. Železo zpevňuje tuhý roztok [1]. Žárupevné slitiny se vyznačují austenitickou strukturou již od 20 – ti % niklu. Odolnost proti okujení je docílena přidavkem chromu, ale také menším množstvím křemíku. Dalšími možnými legurami jsou mangan, z důvodu stabilizace, a vanad zvyšující odolnost proti tečení [7]. Prvotními žárupevnými slitinami byly slitiny, vyvinuté počátkem 40. let v Anglii, označované Nimonic. Dnešními standardními superslitinami jsou například Hastelloy, Inconel, Rene a mnohé další. Stále se rovněž používají i slitiny Nimonic. Všechny tyto superslitiny většinou disponují kombinací korozivzdorných a zároveň žárupevných vlastností [8].

První slitinou z řady Nimonic byla slitina, označovaná jako NIMONIC 75. Jednalo se o precipitačně zpevněnou slitinu titanem a uhlíkem, avšak kvůli nedokonalé technologii odlévání byl obsah zpevňující fáze malý. Tento problém se podařilo vyřešit zavedením vakuového tavení v 50. letech. Zjistilo se také, že k mnohem lepšímu zpevnění dochází legováním hliníku, kdy vzniká fáze  $\text{Ni}_3\text{Al}$  a titan nahrazuje část hliníku  $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ . Na základě nových poznatků byla vyvinuta nová slitina NIMONIC 80A, která se používala na lopatky plynových turbín. Zdokonalenou slitinou pak byla slitina NIMONIC 115, u které došlo k legování kobaltem a molybdenem, což snížilo energii vrstevné chyby. Složení slitin Nimonic je uvedeno v tabulce 5 a mechanické vlastnosti těchto slitin jsou v tabulce 6 [8].

U skupiny Inconelů se nejčastěji jedná o slitiny niklu a chromu, ale přidávají se i další legující prvky. V případě tvářených Inconelů legovaných chromem a železem vzniká například INCONEL 600, s přidáním molybdenu, niobu, titanu a wolframu vznikají například INCONEL 625 a 725. S přidavkem legujících prvků titan, hliník, molybden a niob, lze dosáhnout precipitačního zpevnění. Takto zpevněné Inconely jsou například INCONEL 751 a X-750, patří zde rovněž lité INCONEL 713LC, 713C, 738 a 738LC [4].

Tvářená slitina INCONEL 600 je korozně i tepelně odolná, navíc s výbornými mechanickými vlastnostmi, odolává koroznímu praskání pod napětím vlivem působení chloridů. Používá se na věže a kondenzátory pro zpracování mastných kyselin, výparníky, v tepelném průmyslu na součásti krbů, vložky do výfuků, těsnění turbín. INCONEL 625 se vyznačuje zvýšeným obsahem molybdenu a niobu, což zvyšuje jeho pevnostní vlastnosti. Slitina je vhodná pro použití v mořské vodě, například na lodní šrouby motorových člunů, výfukové potrubí námořních lodí, pláště podmořských komunikačních kabelů. V oblasti letectví se používá pro hydraulická a palivová potrubí, výfukový systém motoru a svařovaná pouzdra se strukturou včelích pláství. V chemickém průmyslu se z této slitiny vyrábějí tenkostěnné nádoby, čímž dojde k úspoře váhy alepší se přenos tepla. Slitina INCONEL 751 se používá hlavně na výfukové ventily spalovacích motorů, jelikož má vysokou odolnost vůči výfukovým plynům (S, Br, Cl). Podobnou slitinou je INCONEL X-750, který se používá na konstrukční prvky plynových turbín a raketových motorů. Chemické složení vybraných Inconelů je uvedeno v tabulce 5 a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 6 [3].

Mezi odlévané superslitiny patří INCONEL 713LC. Jedná se o polykrystalickou superslitinu zpevněnou precipitáty  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{AlTi}$ . Slitina INCONEL 713LC je nízkouhlíková modifikace lité slitiny INCONEL 713C, nízký obsah uhlíku je dodržen z důvodu omezení tvorby karbidů. INCONEL 713LC má dobré mechanické vlastnosti,

odolnost vůči korozi a navíc výbornou odolnost vůči creepu. Obrobitelnost slitiny je špatná, a proto se používá metoda přesného lití na vytavitelný model. Slitina se používá v leteckém a energetickém průmyslu. Dalším zástupcem litých superslitin je INCONEL 738 LC, což je rovněž niklová polykrystalická superslitina zpevněná precipitáty  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ,  $\text{Ni}_3\text{AlTi}$ . Tato slitina je nízkouhlíková modifikace litého INCONELU 738. Vlastnosti a možnosti použití INCONELU 738LC jsou stejné jako v případě INCONELU 713 LC, avšak INCONEL 738 LC má vyšší žáruvzdornost, z důvodu vyššího obsahu chromu. Naproti tomu má slitina nižší žárupevnost, proto se tepelně zpracovává homogenizačním žiháním a následně vytvrzováním (precipitací). Chemické složení a mechanické vlastnosti vybraných Inconelů jsou uvedeny v tabulce 5 a 6 [9].

Dalšími standardními slitinami jsou slitiny, označované jako RENE. Například odlévaná slitina RENE 77 je tepelně zpracovaná slitina, z které se v Polsku vyrábějí lopatky parních turbín [8].

Tab. 5 Chemické složení vybraných niklových superslitin [6,9]

<i><u>Tvářené slitiny</u></i>	Chemické složení [%]									
	Ni	Cr	Co	Mo	Nb	Ti	Al	Fe	C	Jiné
NIMONIC 75	75,0	19,5	-	-	-	0,40	0,15	2,5	0,12	max. 0,25 Cu
NIMONIC 80A	73,0	19,5	1,0	-	-	2,25	1,40	1,5	0,05	max. 0,10 Cu
NIMONIC 115	55,0	15,0	15,0	4,0	-	4,00	5,0	1,0	0,20	0,04 Zr
INCONEL 600	76,0	15,5	-	-	-	-	-	8,0	0,08	0,25 Cu
INCONEL 625	61,0	21,5	-	9,0	3,6	0,20	0,20	2,5	0,05	-
INCONEL 725	57,0	21,0	-	8,0	3,5	1,50	max. 0,35	9,0	max. 0,03	-
INCONEL 751	72,5	15,5	-	-	1,0	2,30	1,20	7,0	0,05	max. 0,25 Cu
INCONEL X-750	73,0	15,5	-	-	1,0	2,50	0,70	7,0	0,04	max. 0,25 Cu

Pokračování tab. 5

<u>Lité slitiny</u>	Chemické složení [%]									
	Ni	Cr	Co	Mo	Al	Ti	C	B	Zr	Jiné
INCONEL 713C	74,0	12,5	-	4,20	6,0	0,8	0,12	0,012	0,10	1,75 Ta, 0,90 Nb
INCONEL 713LC	75,0	12,0	-	4,50	6,0	0,6	0,05	0,010	0,10	4,0 Ta
INCONEL 738	61,5	16,0	8,50	1,75	3,4	3,4	0,17	0,010	0,10	2,6 W, 2,0 Nb
INCONEL 738LC	62,132	15,9	8,26	1,74	3,3	3,3	0,11	0,008	0,03	0,25 Cu
RENE 77	58,0	15,0	15,00	4,20	4,3	3,3	0,07	0,015	0,04	0,15 Fe, 2,54 W, 1,65 Ta, 0,88 Nb

Tab. 6 Mechanické vlastnosti, vzorků tyčí za pokojové teploty (21°C), vybraných niklových superslitin [3,6,8,9]

<u>Tvářené slitiny</u>	R <sub>e</sub> (R <sub>p0,2</sub> ) [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]
NIMONIC 75	285	745	40
NIMONIC 80A	620	1000	39
NIMONIC 115	865	1240	27
INCONEL 600	285	660	45
INCONEL 625	490	965	50
INCONEL 725	917	1241	30
INCONEL 751	976	1310	22,5
INCONEL X-750	815	1200	27
<u>Lité slitiny</u>			
INCONEL 713C	740	850	8
INCONEL 713LC	750	895	15
INCONEL 738	950	1095	-
INCONEL 738LC <sup>1)</sup>	≥ 772	≥ 927	> 4
RENE 77	676	690	6 *

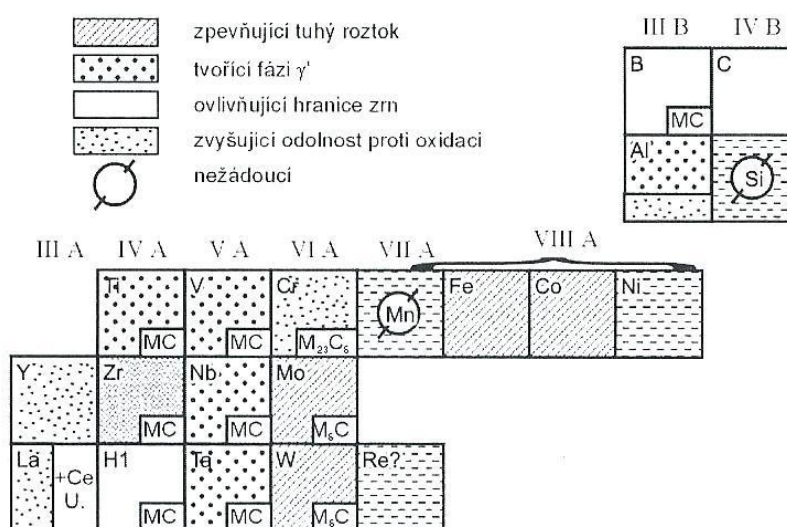
\* hodnota kontrakce Z

<sup>1)</sup> hodnota po tepelném zpracování slitiny, krátká zkušební tyč (A<sub>5</sub>)

Z tabulek chemického složení a mechanických vlastností vyplývá, že výrazně vyšších mechanických vlastností dosahují slitiny precipitačně zpevněné fází  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Zvýšení mechanických vlastností závisí rovněž na druhu a množství legujících prvků.

### 3.2.1. Vliv prvků obsažených v superslitinách

Nikl, železo a kobalt jsou prvky tvořící matici slitiny (tuhý roztok  $\gamma$ ). Nikl je základní složkou superslitin, určuje stabilitu a strukturu fáze. Železo může částečně nahradit nikl, tím dojde k úspoře nákladů. Kobalt zvyšuje žárupevnost, zajišťuje dobré technologické vlastnosti, snižuje energii vrstevné chyby a spolu s titanem, případně tantalem stabilizuje tuhý roztok  $\gamma$ . Přídavkem chromu dojde ke zvýšení odolnosti proti oxidaci, tečení, zároveň dochází ke zpevnění matrice a ke zvýšení plasticity. Nejvhodnější množství chromu je v rozmezí 15 – 30% a dochází k tvorbě stabilního karbidu  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ . Snížení energie vrstevné chyby a stabilizující účinek mají rovněž prvky molybden a wolfram. Pokud dojde k legování hliníkem, dochází k nárůstu žárovzdornosti a zpevnění pomocí intermetalické fáze  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ). Prvky, které nahrazují hliník ve fázi  $\gamma'$ , jsou titan, tantal, niob a vanad. Bor, zirkonium a hafnium ovlivňují morfologii precipitátů, čímž dochází ke zvýšení odolnosti proti tečení a křehkému porušení za vyšších teplot. Prvky vzácných zemin, jako je například cer, zlepšují odolnost proti vysokoteplotní oxidaci. Ostatní prvky jsou brány jako nežádoucí, i přesto, že například křemík působí pozitivně na žárovzdornost, mangan na rovnoměrnost rozmístění karbidů vytvořených ve slitině a malé množství hořčíku zlepšuje mechanické vlastnosti. Vliv jednotlivých legujících prvků je znázorněn na obrázku 4 [8].



Obr. 4 Vliv jednotlivých legujících prvků v superslitinách [8]



### 3.3. Slitiny se zvláštními fyzikálními vlastnostmi

Tyto slitiny lze rozdělit na slitiny s nízkou tepelnou roztažností, slitiny magnetické a slitiny používané na odpory a termočlánky. Slitiny s nízkou tepelnou roztažností se používají na bimetalické teploměry a spínače. Jsou to například invar (FeNi36) nebo superinvar (FeNi32Co5) [1]. Slitiny magnetické jsou rozděleny na magneticky měkké a tvrdé. Měkké se používají na toroidy transformátorů a jejich zástupcem je permalloy (78,5% Ni, 21,5% Fe) nebo supermalloy (78,5% Ni, 18,5% Fe a 3% Mo). Tvrdé jsou například slitiny Al-Ni, Al-Ni-Co. Slitiny na odpory jsou konstantan (Cu-Ni45) a nikelin (Cu-Ni30), s měrným odporem mezi 0,5 až 0,4  $\mu\Omega\text{m}$ . Jsou z nich vinuty odpory v potenciometrech a regulátorech napětí do 550°C. Pro topné spirály a regulační odpory do 1150°C se používá slitina chromnikl (80% Ni, 20% Cr). Na termočlánky se používá kombinace chromel-alumel do 1100°C (chromel 91% Ni, 9% Cr a alumel zhruba 95% Ni, 2% Al, 1% Si a 2% Mn), případně dvojice železo-konstantan do 750°C [7].

### 4. Intermetalické sloučeniny, niklové aluminidy

Speciální skupinou slitin niklu jsou intermetalické sloučeniny. Tyto sloučeniny jsou tvořeny intermetalickou fází, složenou ze dvou a více kovových prvků, jejichž atomy tvoří uspořádanou krystalovou strukturu. Intermetalické sloučeniny mohou být například na bázi: TiAl, Ti<sub>3</sub>Al, NiAl, Ni<sub>3</sub>Al, CuZn, Cu<sub>3</sub>Au, Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Mechanické vlastnosti se pohybují mezi vlastnostmi kovů a keramiky, avšak kovy jsou měkčí a více tažné, a keramika je tvrdší a křehčí než intermetalické sloučeniny. Rovněž dle atomárních vazeb jsou tyto sloučeniny kombinací kovových vazeb, vyskytujících se v kovech, a vazeb kovalentních, které se vyskytují v keramických materiálech. Odlišná struktura intermetalických sloučenin má výrazný vliv na pevnost a tažnost těchto materiálů. Materiálový vývoj obecně, je zaměřen na vysoce pevné slitiny s malou hustotou. V oblasti intermetalických sloučenin probíhá výzkum zaměřený na zlepšení mechanických vlastností niklových aluminidů, kterými jsou slitiny na bázi TiAl, Ti<sub>3</sub>Al, NiAl, Ni<sub>3</sub>Al, FeAl a Fe<sub>3</sub>Al. Studium intermetalických sloučenin se zabývalo výzkumné pracoviště Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [10].

Niklové aluminidy jsou intermetalické sloučeniny s vyšším obsahem hliníku, než je tomu například u niklových superslitin. Obsah hliníku je mezi 10 až 30 hmotnostními procenty. Hliník obsažený ve slitinách způsobuje vznik souvislé ochranné vrstvy oxidu hlinitého, jelikož dochází k interakci s kyslíkem obsaženým v atmosféře. Ochranná vrstva způsobuje velmi dobrou odolnost vůči oxidaci a odolnost vůči působení uhlíku za vysokých teplot.

Oproti ochranné vrstvě  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , která chrání niklové superslitiny, je vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$  termodynamicky stabilnější za vysokých teplot. Niklové aluminidy mají nízkou hustotu, vysoký bod tání a vzhledem k jejich krystalové struktuře disponují také dobrými mechanickými vlastnostmi. Hlavními výhodami niklových aluminidů jsou:

- odolnost vůči oxidaci a nauhličování v redukčních i oxidačních atmosférách až do  $1100^\circ\text{C}$
- dobrá mez kluzu a mez pevnosti v teplotách  $650 - 1100^\circ\text{C}$ , oproti niklovým superslitinám
- dobrá odolnost vůči únavě, na rozdíl od niklových superslitin neobsahují karbidy
- dobrá odolnost vůči tečení (creepu), způsobená velikostí zrn odlévaných aluminidů
- vynikající odolnost vůči opotřebení za teplot  $\geq 600^\circ\text{C}$
- odolnost oxidační vrstvy  $\text{Al}_2\text{O}_3$  v mnoha typech prostředí

Nevýhodou niklových aluminidů je nízká tažnost, křehký lom a náročnější metody výroby. Výzkum směřovaný na zlepšení vlastností těchto slitin zaznamenal výrazný posun vpřed, a proto se dnes niklové aluminidy komerčně využívají a svými vlastnostmi se vyrovnají mnohým standardním niklovým slitinám a dalším kovovým materiálům [11].

#### **4.1. Intermetalické sloučeniny s fází $\text{Ni}_3\text{Al}$**

Výzkumné práce, prováděné na intermetalických sloučeninách typu  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , byly zaměřeny především na zvýšení tažnosti a rovněž na modifikaci lomové struktury. V závislosti na nízké tažnosti se u těchto slitin projevoval křehký lom, proto bylo potřeba zvýšit tažnost a dosáhnout lomu tvárného. Nízká tvárnost a následný křehký lom byly způsobeny, vlivem vodíku ze vzdušné vlhkosti, vodíkovou křehkostí. Vylepšení těchto vlastností bylo dosaženo zejména pomocí legování bórem [11]. Na výzkumném pracovišti ORNL byly vyvinuty intermetalické slitiny s fází  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , které se používají jako konstrukční materiály v mnoha zařízeních. Jsou to slitiny označované IC-50, IC-396, IC-396LZr (slitina stejná jako IC-396, avšak s menším množstvím zirkonia), IC-221M, IC-438 [12], dále taktéž slitina IC-221W (připravená práškovou metalurgií) a IC-218LZr [11]. Chemické složení slitin je uvedeno v tabulce 7 [12].

Tab. 7 Chemické složení intermetalických sloučenin s fází  $\text{Ni}_3\text{Al}$  [11,12]

Slitina	Chemické složení [hm. %]					
	Al	Cr	Mo	Zr	B	Ni
IC-50	11,30	-	-	0,06	0,020	88,08
IC-396	7,98	7,72	3,02	0,85	0,005	80,42
IC-396LZr	7,98	7,72	3,02	0,02	0,005	81,08
IC-221M	8,00	7,70	1,43	1,70	0,008	81,10
IC-438	8,10	5,23	7,02	0,13	0,005	79,52
IC-221W <sup>1)</sup>	8,00	7,70	1,50	3,00	0,003	79,80
IC-218LZr <sup>2)</sup>	8,70	8,10	-	0,2	0,02	83,10

<sup>1)</sup> slitina připravená práškovou metalurgií, <sup>2)</sup> slitina zpracovávaná za tepla a za studena

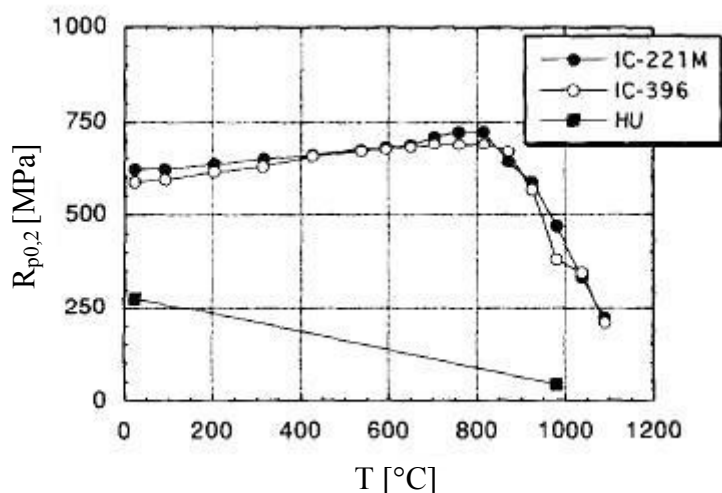
Hustoty slitin se pohybují v rozmezí  $7,86 - 7,88 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , s výjimkou slitiny IC-50, která má hustotu  $7,60 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Nejvíce studovanou a také komerčně používanou slitinou je slitina IC-221M. Slitina IC-221M je jediná, u níž je vrchní hranice teploty použití limitována eutektikem  $\text{Ni}_3\text{Zr}_5$ , eutektická teplota tavení této fáze je  $1171^\circ\text{C}$ . Nicméně se tato slitina dá jako jediná svařovat [12].

## 4.2. Mechanické vlastnosti slitin $\text{Ni}_3\text{Al}$

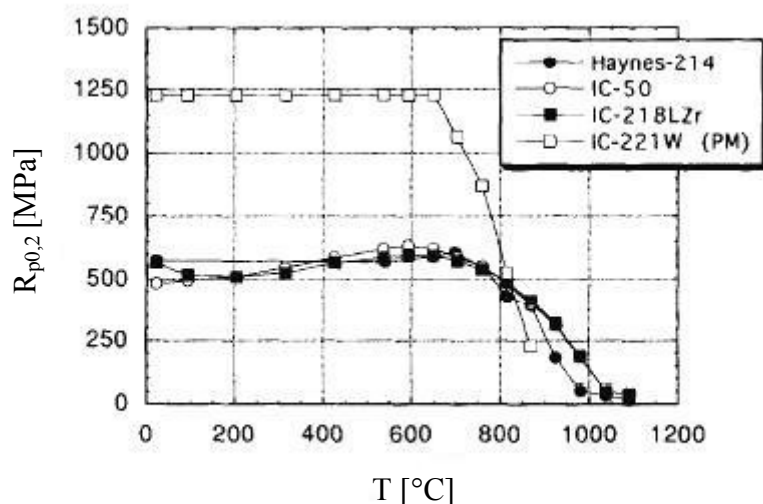
Zlepšení tažnosti a křehkého lomu bylo dosaženo pomocí legování bórem, poprvé v Japonsku, výzkumem se zabývali Aoki a Izumi. Vliv bóru zkoumal rovněž Liu a kolektiv na výzkumném pracovišti ORNL. Jejich výzkum dokázal, že tažnost u slitin na bázi  $\text{Ni}_3\text{Al}$  se zvětší na 40 – 50% již při legování 0,04 hm. % bóru. Naopak přidáním 0,5 at. % bóru vedlo ke snížení tažnosti z 50% na 24% a se zvýšeným množstvím hliníku nad 25 at. % došlo ke snížení tažnosti ještě výrazněji, až na pouhých 5%. Působení bóru ve slitině je plně nevysvětlený složitý proces. Je však jisté, že má bór pozitivní vliv na síly působící po hranicích zrn, čímž dochází k potlačení vodíkové křehkosti. Legury jako je chrom a zirkonium zvyšují pevnost a tažnost za vyšší teploty, snižují smršťování během tuhnutí, zvyšují přilnavost oxidační vrstvy vytvořené na povrchu kovu a zlepšují odolnost vůči vysokoteplotní korozi [11]. Chrom v obsahu 6 – 8 at. % tvoří ochrannou oxidickou vrstvu, která brání difuzi kyslíku z prostředí do kovu. Prvky, které působí na zvýšení tažnosti, jsou rovněž prvky ovlivňující tažnost matrice slitin  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Těmito prvky jsou železo, mangan, zirkonium a beryllium, které mohou v matici obsazovat polohy niklu, hliníku nebo obě polohy. Na tažnost má rovněž vliv proces přípravy a zpracování této slitiny [13].

Další mechanickou vlastností, na kterou byl zaměřen výzkum, je mez kluzu. Mez kluzu je závislá na poloze, kterou legující prvek obsazuje v mřížce  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , na rozdílu velikosti atomů a na poměru niklu a hliníku obsaženém ve slitině. Výzkum Rawlingse a Statona ukázal, že je zpevnění ovlivňováno pouze legujícími prvky, které obsazují polohy hliníku v mřížce  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Záleží rovněž na rozdílu velikosti atomů hliníku a legujícího prvku, s výraznějším rozdílem dochází k většímu zpevnění, přičemž zpevnění je výraznější u slitin s vyšším obsahem hliníku. Prvkem, který nejvýrazněji zpevňuje slitiny  $\text{Ni}_3\text{Al}$  je hafnium. Zpevňujícím prvkem je také bór, nebo titan, který zvýšením antifázového rozhraní zvyšuje pevnost [13].

Mechanické vlastnosti slitin IC-50, IC-221M, IC-396, IC-438 a IC-221W, o chemickém složení uvedeném v tabulce 7, jsou v mnoha ohledech srovnatelné se standardně používanými slitinami. Například, v porovnání s komerčně používanou slitinou, označovanou jako HU o složení FeNiCr, jsou mechanické vlastnosti litých intermetalických slitin IC-221M a IC-396 dokonce podstatně vyšší. Slitina HU se používá na díly pecí pracujících za vysokých teplot. Mez kluzu slitin IC-221M a IC-396 je, za pokojových teplot, dvakrát vyšší v porovnání se slitinou HU (hodnota  $R_{p0,2}$  slitin IC-221M a IC-396 je zhruba 600 MPa). To dokládá obrázek 5. Slitiny IC-221M a IC-396 dosahují rovněž přibližně stejné hodnoty meze kluzu jako další komerčně používaná slitina Haynes-214 (hm. %: 75,35 Ni; 16,0 Cr; 4,5 Al; 3,0 Fe; 0,1 Si; 0,03 C; 0,02 Y). Tvářená slitina IC-50 má vyšší mez kluzu než slitina HU, avšak v porovnání se slitinou Haynes-214 dosahuje menších hodnot meze kluzu, obrázek 6 [11]. Vyšší meze kluzu dosahuje také slitina IC-438 (hodnota  $R_{p0,2}$  je zhruba 580 MPa) [12] a nejvyšších hodnot dosahuje slitina, připravená práškovou metalurgií, IC-221W [11].

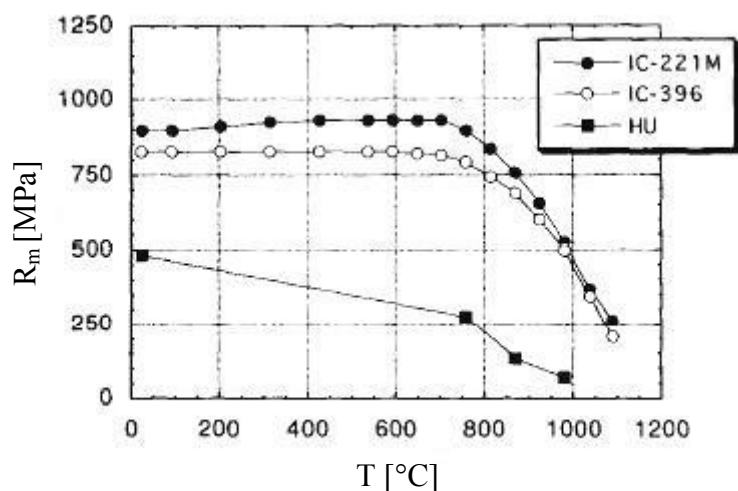


Obr. 5 Mez kluzu slitin IC-221M, IC-396 a HU [11]

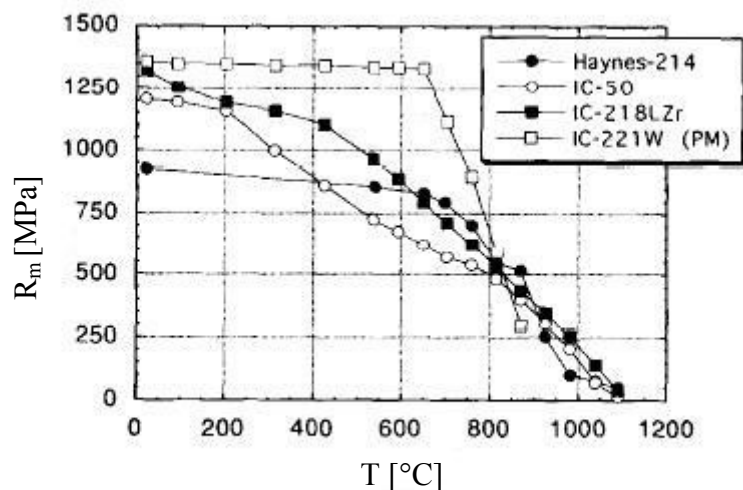


Obr. 6 Mez kluzu slitin IC-50, IC-221W a Haynes-214 [11]

Mez pevnosti, za pokojových teplot, intermetalických sloučenin IC-50, IC-221M, IC-396 a IC-221W s chemickým složením dle tabulky 7, dosahuje značně vyšších hodnot v porovnání se slitinou HU. Slitiny IC-221M a IC-396 dosahují takřka dvojnásobné meze pevnosti (hodnota  $R_{p0.2}$  je zhruba 800 MPa) obrázek 7. V porovnání se slitinou Haynes-214 mají slitiny IC-50 a IC-221W výrazně vyšší mez pevnosti obrázek 8, na rozdíl od slitin IC-221M a IC-396, které dosahují nižších hodnot meze pevnosti. Nicméně hodnoty pevnosti slitin IC-221M a IC-396 se blíží hodnotě meze kluzu slitiny Haynes-214 (hodnota  $R_{p0.2}$  je u slitin IC-221M a IC-396 zhruba 935 MPa) [11]. Slitina IC-438 dosahuje v porovnání se slitinou Haynes-214 srovnatelné meze pevnosti zhruba 940 MPa [12].

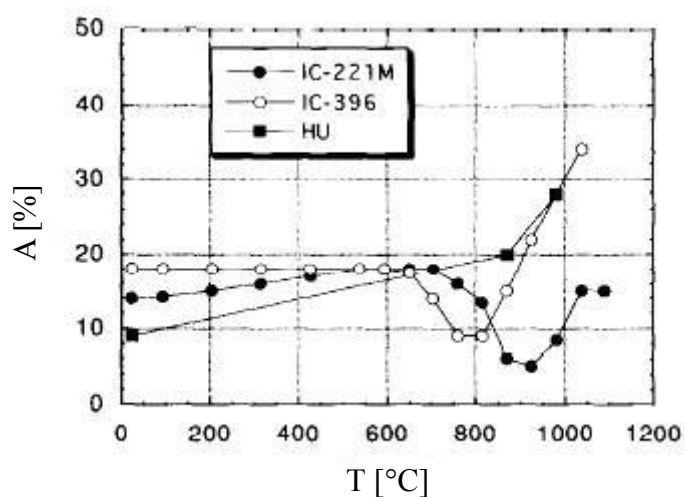


Obr. 7 Mez pevnosti slitin IC-221M, IC-396 a HU [11]



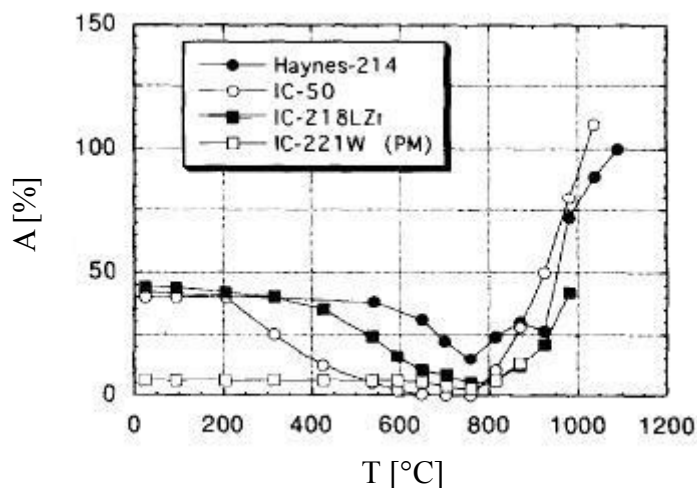
Obr. 8 Mez pevnosti slitin IC-50, IC-221W a Haynes-214 [11]

Tažnosti slitin IC-221M a IC-396 převyšují tažnost slitiny HU obrázek 9, avšak nedosahují tažnosti slitiny Haynes-214. Tvářená slitina IC-50 dosahuje nejvyšších hodnot tažnosti až 40%, což je hodnota srovnatelná s tažností slitiny Haynes-214, obrázek 10 [11]. Vyšší hodnotu tažnosti než slitiny IC-221M a IC-396 má slitina IC-438 (tažnost 20%) [12], naproti tomu slitina IC-221W připravená práškovou metalurgií, dosahuje velmi malé hodnoty tažnosti, pouze 5% [11].



Obr. 9 Tažnost slitin IC-221M, IC-396 a HU [11]





Obr. 10 Tažnost slitin IC-50, IC-221W a Haynes-214 [11]

Velmi dobré mechanické vlastnosti jsou navíc doplněny odolností vůči oxidaci a creepu. Díky kombinaci těchto vlastností jsou slitiny IC-50, IC-221M, IC-396 a IC-438 vhodnými konstrukčními prvky v široké oblasti použití. Jejich mechanické vlastnosti uvedené v tabulce 8 jsou srovnatelné, nebo lepší v porovnání s uvedenými komerčními slitinami HU a Haynes-214 [11].

Tab. 8 Přehled přibližných hodnot mechanických vlastností slitin IC-50, IC-221M, IC-396, IC-438, IC-221W a IC-218LZr [11,12]

Slitina	$R_e (R_{p0,2})$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	A [%]
IC-50 <sup>1)</sup>	470	1200	40
IC-221M	620	900	14
IC-396	580	825	18
IC-438	575	935	20
IC-221W <sup>2)</sup>	1225	1350	5
IC-218LZr <sup>3)</sup>	570	1320	42

<sup>1)</sup> tvářená slitina, <sup>2)</sup> slitina připravená práškovou metalurgií,

<sup>3)</sup> slitina zpracovávaná za tepla a za studena

V novější publikaci [14] se uvádějí hodnoty mechanických vlastností, slitiny IC-221M za pokojové teploty, mez kluzu  $R_{p0,2} = 555$  MPa, mez pevnosti  $R_m = 770$  MPa a tažnost  $A = 14\%$ .

Tyto intermetalické slitiny předčí svými mechanickými vlastnostmi mnohé superslitiny, například slitiny Nimonic, Rene, Hasteloy, a taktéž dokážou konkurovat mnohým slitinám typu Monel a Inconel. Dosahují například lepších mechanických vlastností než tvářené slitiny

Inconel 600, 625. Atraktivní jsou jejich mechanické vlastnosti, zejména v porovnání s litými niklovými superslitinami IN 713C, IN 713LC, IN 738 a IN 738LC, které se používají pro vysokoteplotní aplikace. V porovnání s těmito superslitinami je patrné, že slitiny IC-50, IC-221M, IC-396 a IC-438 dosahují téměř shodné pevnosti, avšak s nižší mezí kluzu. Velkou předností těchto intermetalických slitin je jejich tažnost, která se pohybuje ve vyšších hodnotách, než je tomu u Inconelů. Mechanické vlastnosti slitin  $\text{Ni}_3\text{Al}$  lze výrazně zlepšit pomocí rafinační metody směrové krystalizace.

## 5. Příklady použití niklových slitin a niklových aluminidů $\text{Ni}_3\text{Al}$

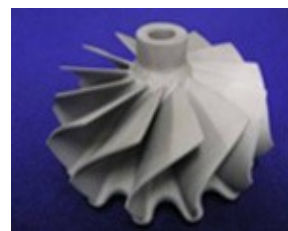
Čistý nikl se používá v elektrotechnice na součásti s magnetickými vlastnostmi, průchodky sklem a anody do akumulátorových baterií [7]. Slitiny niklu nacházejí uplatnění jako lopatky v leteckých a parních turbínách, lopatky v tryskových motorech (obr. 11a) a dalších konstrukčních částech tryskových motorů (obr. 11b). V automobilovém průmyslu se niklové superslitiny používají na turbíny v turbodmychadlech (obr. 11c), ventily motorů (obr. 11d), a na výfukový systém (obr. 11e,f). Ve zdravotnictví se slitiny používají jako protetická zařízení, dále žáruvzdorné vybavení, zařízení na zplyňování uhlí a systémy na zkapalňování, taktéž zařízení v celulózkách a papírnách [15].



a)



b)



c)



d)



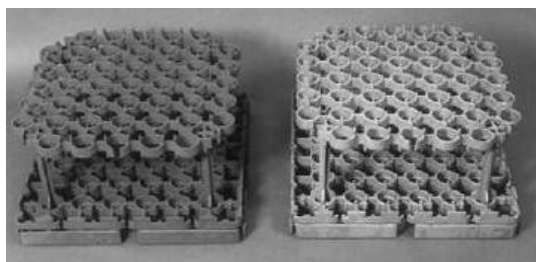
e)



f)

Obr. 11 Příklady použití niklových slitin: a) turbínové lopatky Inconel 738C, b) oběžné kolo turbínového motoru Inconel 713LC, c) turbínové kolo turbodmychadla Inconel 713C [16], d) ventily motorů Inconel 751 [17], e) a f) výfukový systém firmy Eisenmann Inconel 625 [18]

Z niklových aluminidů  $\text{Ni}_3\text{Al}$  se používají především lité výrobky [12]. Ty se používají například jako tepelně zpracovávané nosné prvky, které se následně využívají v oxidačním a cementačním prostředí (obr. 12a), válce pro pece, válcující ocelové díly (obr. 12b), formy pro zápusťkové kování (obr. 12c), háky pro pece pracující za vysokých teplot (obr. 12d), dále součásti kalcinačních pecí a trubky hořáků pro vytápění pecí [19]. Používají se také na kotvící a spojovací části v pecích (obr. 12e), topné součásti, součásti brzdových systémů (obr. 12f), trubky kotlů, nádrže na solné roztoky a na roztoky kyseliny sírové [14].



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Obr. 12 Použití slitiny IC-221M: a) nosné prvky v pecích [19], b) válce pro pece válcující ocel [12], c) forma pro zápusťkové kování, d) nosný hák pro pece pracující za vysokých teplot [19], e) kotvící a spojovací části v pecích ze slitiny IC-438, f) kovaný brzdový stabilizátor pro nákladní automobily [14]

## 6. Vakuové tavení a odlévání, proces Exomelt™

Tavení a odlévání ve vakuu umožňuje výrazně snížit obsah kyslíku a dusíku v tavenině, čehož není možné tavením a litím na vzduchu dosáhnout. Superslitiny tavené a lité ve vakuu mají vyšší odolnost proti únavě a také lepší odolnost vůči působení napětí. Naproti tomu je metoda vakuového tavení a lití, ve srovnání s klasickým odléváním na vzduchu, nákladnější. Tavením a litím ve vakuu dochází rovněž k výraznému snížení obsahu uhlíku a síry, avšak konečný obsah příměsí je závislý na čistotě použitého materiálu [6].

Během vakuového tavení a odlévání může dojít také k reakci roztaveného kovu s licím kelímkem. Problémem tavení a odlévání intermetalických fází, jako jsou slitiny  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , je malý interval koncentrace, ve kterém se nachází intermetalická sloučenina. To obecně způsobuje složitost procesu tavení a lití intermetalických slitin. K tavení slitin  $\text{Ni}_3\text{Al}$  se používají keramické kelímky, například  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CaO}$ , a k odlévání se používají grafitové kokily [13].

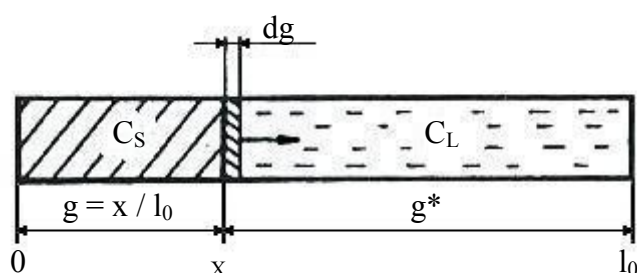
Proces vakuového tavení probíhá v žáruvzdorném kelímku, kolem kterého jsou umístěny indukční cívky. V kelímku se roztaví vsázka a ve chvíli, kdy je veškerá vsázka roztavena, dojde k odplynění komory, čímž se vytvoří vakuum. Následně dojde k odlití taveniny do připravené kokily, rovněž ve vakuu [6]. Odlité ingoty mají většinou licí vady (staženiny a řediny), které je možné odstranit pomocí přetavování, například ve vakuu nebo v inertním plynu. Přetavením dojde k úpravě velikosti, tvaru a rozložení zrn, ke zlepšení povrchu a ke zvýšení čistoty odlitých ingotů [13].

Pro tavení slitin na bázi  $\text{Ni}_3\text{Al}$  se nově používá proces Exomelt™. Tento proces využívá exotermní reakci hliníku s niklem k roztavení legujících prvků, které mají vyšší teploty tání a jsou spolu ve vsázce. Tavící kelímek je naplněn vrstvou niklu ve spodní části, nad ním je vrstva legujících prvků. Další vrstvu tvoří opět nikl, který se nachází „jakoby v sendviči“ mezi vrstvami hliníku po stranách. Kelímek se zahřívá na  $800^\circ\text{C}$  a dochází k roztavení hliníku, který reaguje s niklem za vzniku  $\text{NiAl}$ . Reakcí uvolněné teplo taví  $\text{NiAl}$  za teploty vyšší než  $1639^\circ\text{C}$ . Kapky taveniny stékají do spodní části kelímků a spolu s uvolněným teplem reagují se zbylým hliníkem a niklem, dochází ke vzniku  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Výhodou procesu Exomelt™ je exotermické teplo, díky němuž dojde k úspoře jedné třetiny až jedné poloviny energie, potřebné na tavení vsázky. Veškerá vsázka je vložena již na začátku a prudký ohřev zabrání oxidaci legujících prvků. Prodlužuje se taktéž životnost tavících kelímků a pece, jelikož se zkrátí doba zahřívání o 50% [14].

## 7. Směrová krystalizace

Směrová krystalizace patří mezi rafinační metody kovů a provádí se za účelem odstranění velmi malých až stopových množství příměsí ve slitině kovu [20].

Metoda je založena na rozdělování příměsí mezi tuhou fází (solidem) a tekutou fází (likvidem). Podstatou metody je posuv fázového rozhraní krystal-tavenina pomalou rychlostí roztaveným ingotkem slitiny kovu. Postup směrové krystalizace je zobrazen na obrázku 13 [20].



Obr. 13 Postup směrové krystalizace [20]

Roztavený ingotek má počáteční délku  $l_0$  a výchozí koncentraci příměsí v celém objemu taveniny  $C_0$ . Výsledná koncentrace příměsí  $C_1(x)$  v utuhlé části ingotku závisí na hodnotách rozdělovacích koncentračních koeficientů příměsí ve slitině. Vztah vyjadřující závislost rozdělovacího koeficientu na koncentraci a množství utuhlé látky vyjádřil W. G. Pfann rovnicí 1 [20].

$$C_1(x) = C_0 \cdot k \cdot (1-g)^{k-1} \quad (1)$$

kde:  $C_1(x)$  – konečná koncentrace příměsí v krystalu

$C_0$  – výchozí koncentrace příměsí v celém objemu taveniny

$k$  – rozdělovací koeficient prvku B v základní složce A

$g$  – utuhlá část krystalu ( $g = \frac{x}{l_0}$ )

$x$  – vzdálenost od počátku ingotku

Účinnost rozdělování příměsí mezi částí solidu a likvidu bude tím účinnější, čím bude velikost rozdělovacího koeficientu  $k$  vzdálenější od jedné ( $k \ll 1$ ,  $k \gg 1$ ). V procesu směrové krystalizace se využívá rozdělování příměsí, které mají rozdělovací koeficient menší než jedna ( $k < 1$ ). V případě, že je  $k < 1$  dochází k obohacování koncové části ingotku o příměsí z přední části ingotku. Tím se sníží výsledná koncentrace příměsí v ingotku a dojde ke zvýšení koncentrace příměsí v koncové části ingotku. V případě, že je  $k > 1$  je proces

opačný. V přední části ingotku dojde k navýšení koncentrace příměsi a v koncové části dojde ke snížení koncentrace příměsi [20].

Směrová krystalizace je proces jednorázový, pokud by došlo k přetavení směrově krystalovaného ingotku, koncentrace příměsi by se znovu vyrovnala na původní hodnotu v celém objemu ingotku. Z tohoto důvodu je nutné koncovou část se zvýšenou koncentrací příměsi odstranit. Vícenásobnou směrovou krystalizaci lze provádět: odstraněním koncové utuhlé části ingotku a následně opětovným provedením směrové krystalizace nebo druhým způsobem s použitím speciálně konstruované lodičky, která je na konci opatřena přepadem. V tomto případě je tavenina s vyšší koncentrací příměsi na konci lodičky oddělována za přepad, v důsledku rozdílné výšky hladin taveniny na konci směrové krystalizace [20].



## 8. Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je poskytnout přehled o dělení a vlastnostech niklových slitin. Zejména pak intermetalických slitin typu  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , se shrnutím jejich mechanických vlastností.

Práce se především zaměřuje na ověření a porovnání poznatků o vlivu chemického složení a směrové krystalizace na struktury jednotlivých typů intermetalických slitin  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , připravených klasickým procesem tavení, následným odlitím a provedením směrové krystalizace Bridgmanovou metodou s vertikálním uspořádáním kelímku.

Na takto připravených experimentálních slitinách proběhne pozorování, dokumentace a popis jednotlivých typů struktur s fází  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , lišících se obsahem hliníku a legujících prvků, avšak odvozených od komerčně používaných intermetalických slitin na bázi  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Porovnání proběhne zejména mezi litým stavem a stavem po směrové krystalizaci. U pozorovaných vzorků bude také provedeno vyhodnocení mikrotvrdosti a pórovitosti.

## 9. Praktická část

Pro praktickou část byly připraveny vzorky vybraných intermetalických slitin, odvozených od již ověřených a průmyslově používaných typů slitin [11,12]. S rozdílem, že chemické složení experimentálních slitin bylo modifikováno. Složení modifikovaných slitin, určených pro praktickou část, je uvedeno v tabulce 9.

Tab. 9 Modifikované složení experimentálních slitin

Typ slitiny	Označení modifikované slitiny	Chemické složení [hm. %]					
		Al	Cr	Mo	Zr	B	Ni
IC-50	A <sub>1</sub>	11,30	-	-	0,60	0,01	88,08
IC-396	A <sub>2</sub>	7,98	7,72	3,02	0,85	0,01	80,42
IC-221M	A <sub>3</sub>	8,00	7,70	1,43	1,70	0,01	81,10
IC-438	A <sub>4</sub>	8,10	5,23	7,02	0,13	0,01	79,52

### 9.1. Příprava vzorků

Slitiny hodnocené v této bakalářské práci byly vakuově indukčně taveny, v korundovém kelímku a odlévány do grafitové kokily. Tímto způsobem byly připraveny tyče o délce přibližně 100 mm a průměru 10 mm. Část odlitků byla směrově krystalizována ve dvouzónové krystalizační peci Bridgmanovou metodou rychlostí 100 mm/h, z důvodu získání usměrněné struktury a odstranění licích vad. Teplota tavení byla 1550°C a tavení probíhalo s použitím interní atmosféry argonu o čistotě 5N. Vzorky byly umístěny v korundové trubici se specifikovaným vrcholovým úhlem. Odlitky a vzorky po směrové krystalizaci byly použity pro stanovení strukturních a mikrostrukturních charakteristik. Na obrázku 14a je odlitý vzorek a na obrázku 14b je vzorek po směrové krystalizaci.

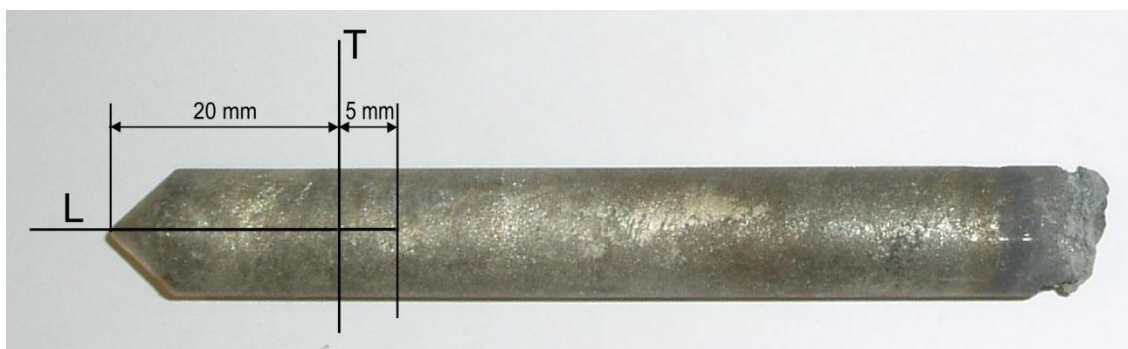


Obr. 14 Vzorek A<sub>4</sub>: a) odlitek, b) vzorek po směrové krystalizaci

## 9.2. Metalografie – příprava

Vzorky byly připraveny na pozorování. Vzorky bylo nutno rozdělit na jednotlivé segmenty tak, aby byl získán příčný a podélný řez z každého vzorku.

Řezání vzorků probíhalo na laboratorní pile MTH MIKRON 110 s vodním chlazením. Pro řezání byly použity řezné kotouče ze speciálního monokrystalického korundu MA 1408 o rozměrech 150 x 0,8 x 20 mm. Z každé slitiny byl připraven vzorek pro strukturní analýzu v litém i usměrněném stavu, a to v podélném (L) i příčném směru (T). Díky tomu mohlo být provedeno srovnání struktury jednotlivých typů slitin v litém a usměrněném stavu. Schéma řezů a vzdálenosti řezů od vrcholu vzorku jsou na obrázku 15.



Obr. 15 Schéma směru řezu - podélný (L) a příčný (T)

Nařezané vzorky byly zabakelitovány na bakelitovacím stroji značky MTH. Pro bakelitování byl použit černý duraplastový prášek (fenolplast). Tento typ černého bakelitu má vodivé vlastnosti, tudíž lze vzorky následně pozorovat elektronovým mikroskopem. Tlak bakelitování byl udržován v rozmezí 200 – 280 bar.

Zabakelitované vzorky byly následně broušeny na laboratorní brusce a leštičce MTH KOMPAKT 1031. Vzorky byly upnuty v hlavici po šesti kusech a broušeny otáčením ve směru hodinových ručiček. Bruska byla nastavena na 280 otáček za minutu. Vzorky byly postupně přebroušeny pod vodou na brusných papírech o zrnitosti 60, 180, 220, 400, 600, 800, 1000 a 1200. Během každé výměny brusného papíru s jemnější zrnitostí byly vzorky v upínací hlavě omyty proudem vody.

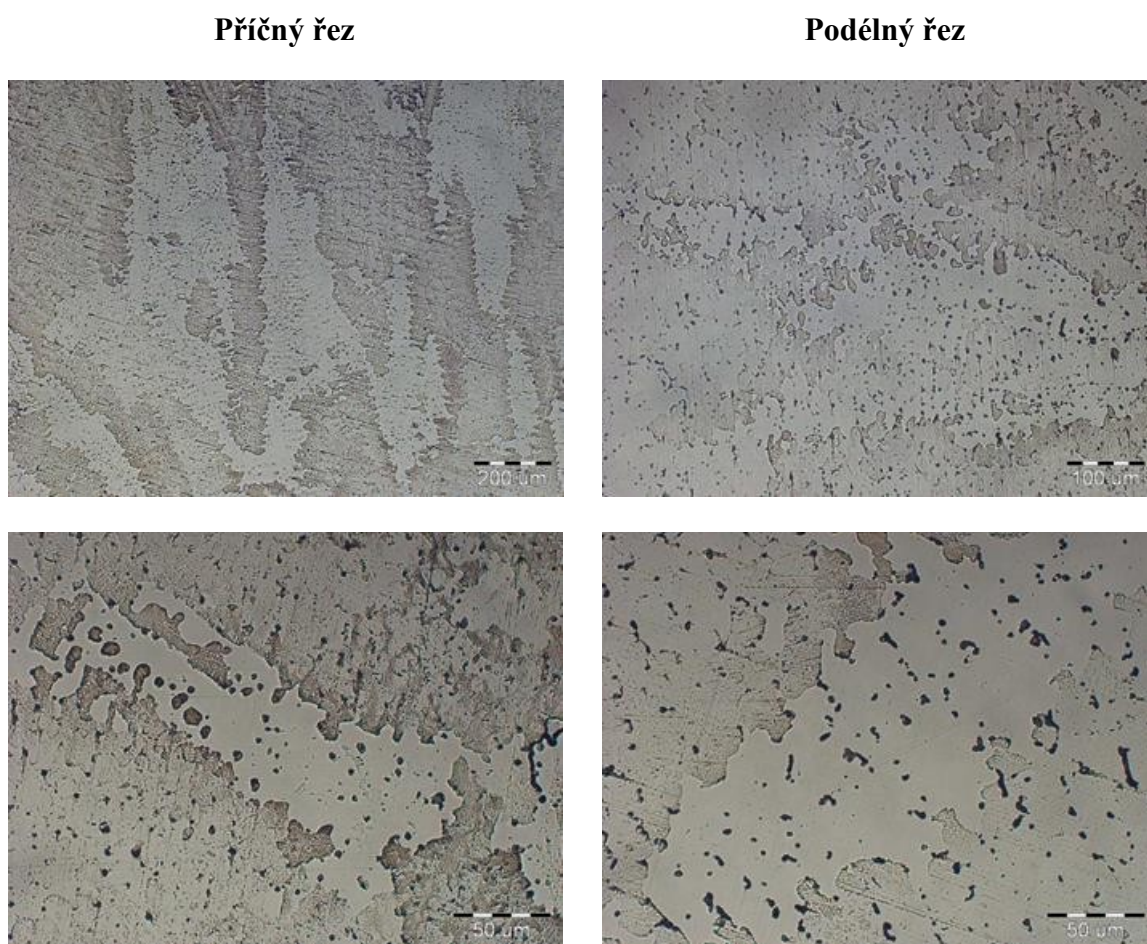
Po přebroušení bylo provedeno leštění na stejném zařízení. Leštění probíhalo na leštícím plátně s použitím hlínky ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Zrnitost hlínky, použité pro přípravu, byla 1  $\mu\text{m}$ . Vzorky byly leštěny po dobu 30 minut do zrcadlového lesku. Rychlost otáček byla snížena na 180 otáček za minutu. Po ukončení leštění byly vzorky opláchnuty vodou, lihobenzinem a vysušeny proudem vzduchu.

Vyleštěné vzorky byly naleptány pro pozorování mikrostruktury. Pro vzorky s označením  $A_1$  bylo použito leptadlo o složení  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HNO}_3$  v poměru 1:1:1. Doba leptání byla zhruba dvě sekundy. Pro vzorky označené  $A_2$  a  $A_3$  bylo použito leptadlo MARBLE o složení  $\text{HCl}$ ,  $\text{CuSO}_4$ , destilovaná voda a methanol. Doba leptání se rovněž pohybovala okolo dvou sekund. Vzorky označené  $A_4$  byly leptány stejným leptadlem, použitým pro vzorky  $A_1$ . Avšak celková doba leptání byla zhruba 21 sekund, přičemž leptání probíhalo opakovaně v intervalech po třech sekundách. Po každém leptání byly všechny vzorky ihned omyty vodou a lehce přeleštěny na plátně s přídavkem hlínky. Poté byly znovu omyty vodou, lihobenzinem a vysušeny fénem.

Naleptané vzorky byly připraveny pro pozorování strukturních a mikrostrukturních charakteristik. Pozorování vzorků probíhalo na inverzním metalografickém mikroskopu OLYMPUS GX 51, vybaveném digitální kamerou OLYMPUS DP12. Pozorované struktury byly zdokumentovány pořízením fotografií o různém zvětšení.

### 9.3. Hodnocení struktury

Na naleptaných vzorcích byla pozorována struktura jednotlivých typů slitin. Na obrázku 16 je zobrazena makrostruktura a mikrostruktura litého vzorku označeného A<sub>1</sub>, což odpovídá složení slitiny IC-50. Fotografie byly pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200  $\mu\text{m}$ ), 200x (měřítko 100  $\mu\text{m}$ ) a 500x (měřítko 50  $\mu\text{m}$ ). Na fotografiích jsou vidět světlejší oblasti odpovídající Ni<sub>3</sub>Al a oblasti tvořené tzv. síťovím. Síťoví je tvořeno tuhým roztokem niklu a v litém stavu je velmi jemné.

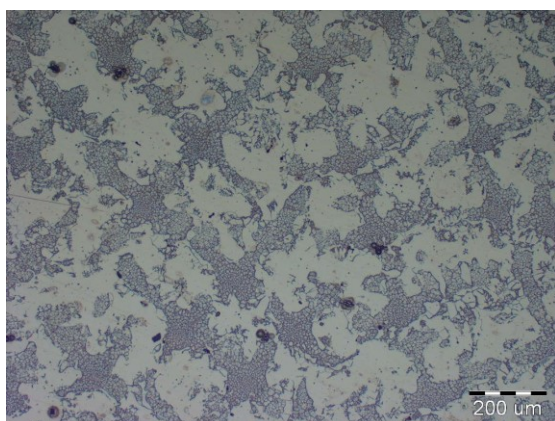


Obr. 16 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>1</sub> v litém stavu

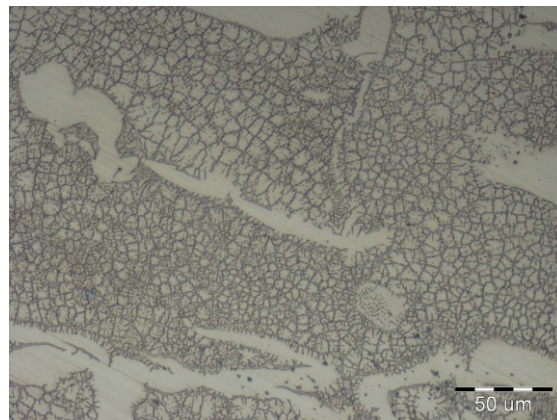
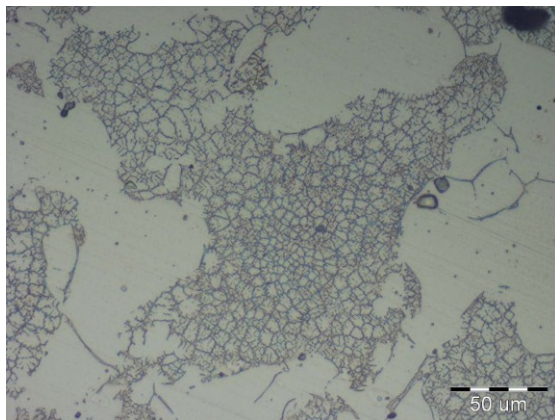
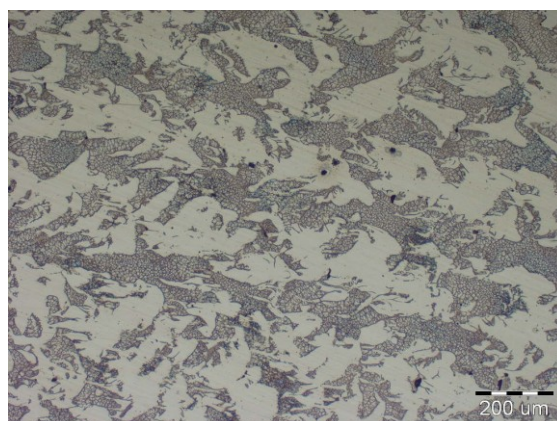


Na obrázku 17 je zobrazena makrostruktura a mikrostruktura vzorku označeného A<sub>1</sub> (složení slitiny IC-50) po směrové krystalizaci. Fotografie byly rovněž pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Na fotografiích jsou zřetelně vidět oblasti zpevňujícího síťoví, které mají výraznou morfolonii. Světlé oblasti odpovídají fázi Ni<sub>3</sub>Al. Na fotografiích jsou vidět také díry (černá místa), které mohly vzniknout při vytržení tvrdých částic s nahromaděným zirkoniem.

**Příčný řez**



**Podélný řez**



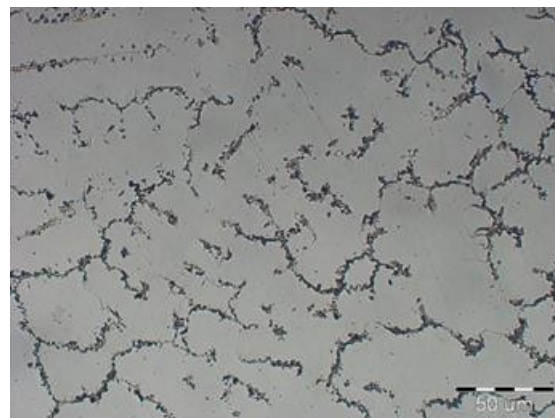
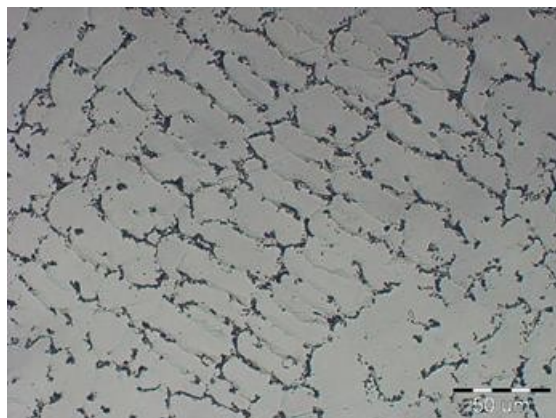
Obr. 17 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>1</sub> v usměrněném stavu

Pozorována byla také makrostruktura a mikrostruktura litého vzorku označeného A<sub>2</sub>, což odpovídá složení slitiny IC-396, obrázek 18. Fotografie byly pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Na fotografiích je vidět vícefázová struktura tvořená základní fází odpovídající nominálnímu složení slitiny a tmavší oblasti síťoví.

**Příčný řez**



**Podélný řez**

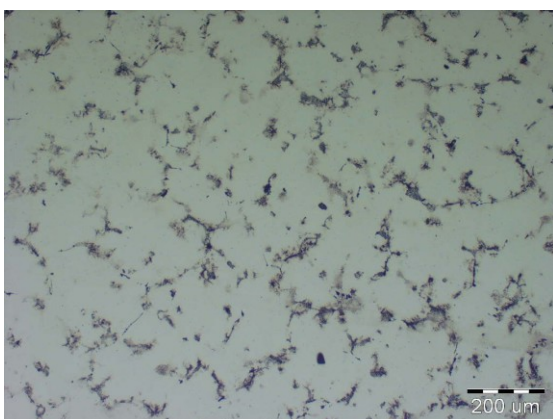


Obr. 18 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>2</sub> v litém stavu

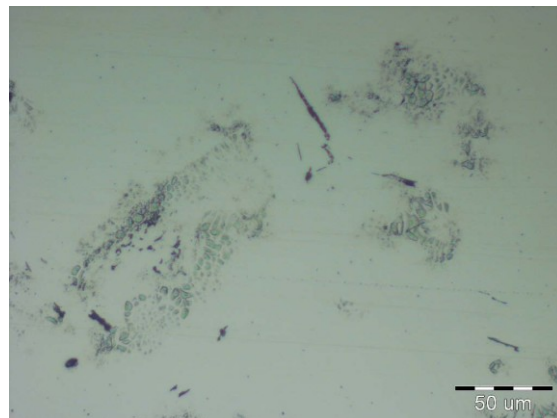
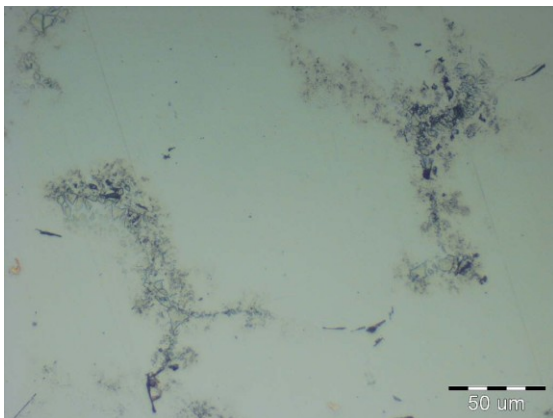
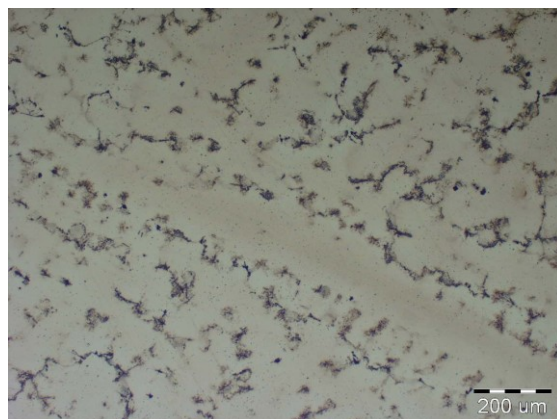


Makrostruktura a mikrostruktura vzorku označeného A<sub>2</sub> (složení slitiny IC-396) byla pozorována také ve stavu po směrové krystalizaci, obrázek 19. Fotografie byly rovněž pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Na fotografiích jsou vidět světlé oblasti tvořené základní fází odpovídající nominálnímu složení slitiny a tmavší oblasti síťoví. Na fotografii mikrostruktury příčného řezu je vidět fáze obsahující síru (žlutá oblast).

**Příčný řez**



**Podélný řez**



Obr. 19 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>2</sub> v usměrněném stavu

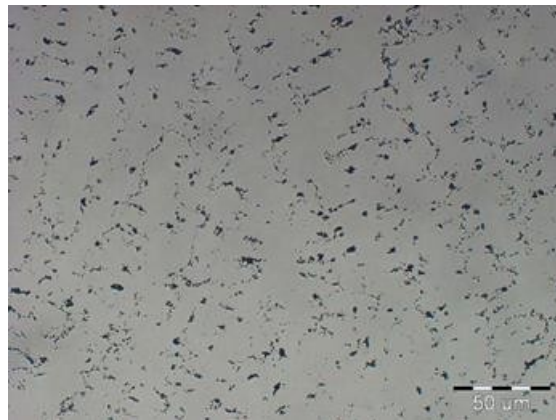
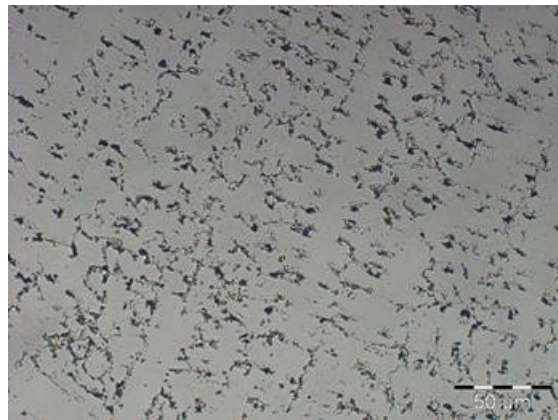


Další pozorovanou strukturou, byla makrostruktura a mikrostruktura litého vzorku označeného A<sub>3</sub>, což odpovídá složení slitiny IC-221M, obrázek 20. Fotografie byly pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Struktura této slitiny je velmi podobná předchozí slitině. Na fotografiích je vidět světlé oblasti tvořené základní fází odpovídající nominálnímu složení slitiny a tmavší oblasti sít'oví.

**Příčný řez**

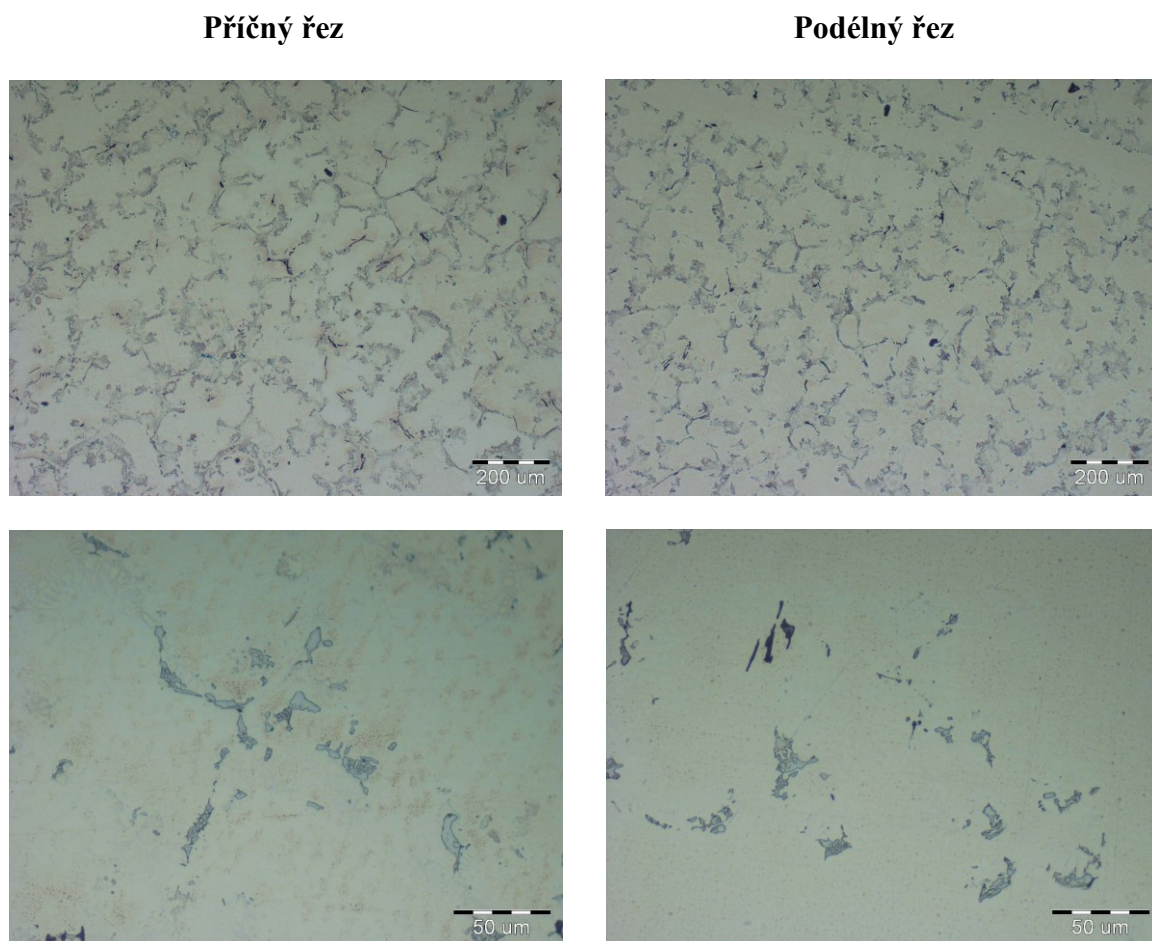


**Podélný řez**



Obr. 20 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>3</sub> v litém stavu

Bylo provedeno rovněž pozorování makrostruktury a mikrostruktury vzorku A<sub>3</sub> (složení slitiny IC-221M) ve stavu po směrové krystalizaci, obrázek 21. Fotografie byly taktéž pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Na fotografiích jsou vidět světlé oblasti základní fáze a tmavší síťoví.

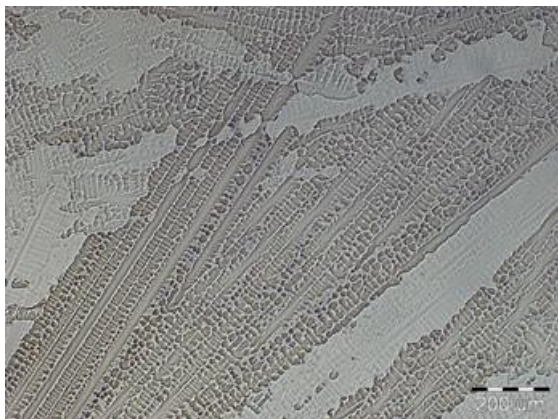


Obr. 21 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>3</sub> v usměrněném stavu

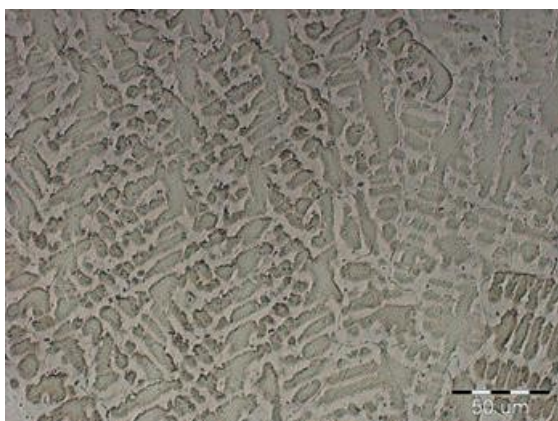
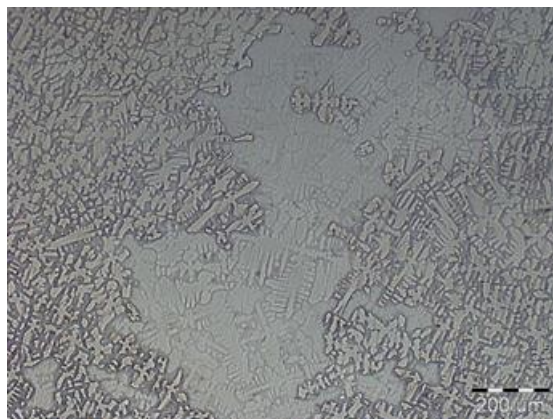


Obrázek 22 zobrazuje makrostrukturu a mikrostrukturu litého vzorku označeného A<sub>4</sub>, což odpovídá složení slitiny IC-438. Fotografie byly pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Na fotografiích odpovídají světlé oblasti základní fázi o nominálním složení.

**Příčný řez**



**Podélný řez**



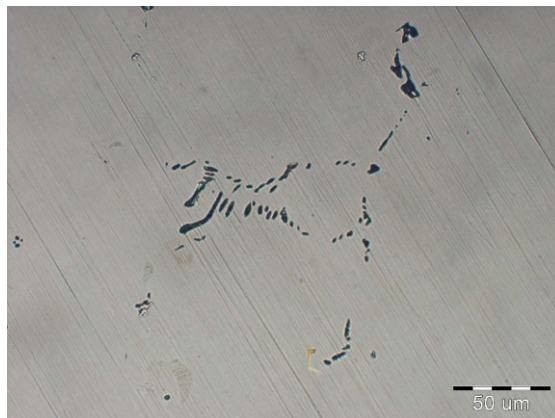
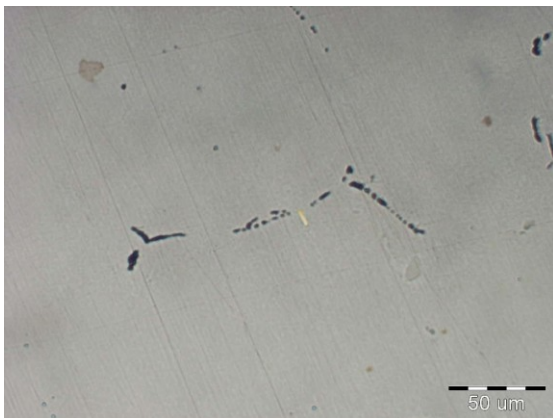
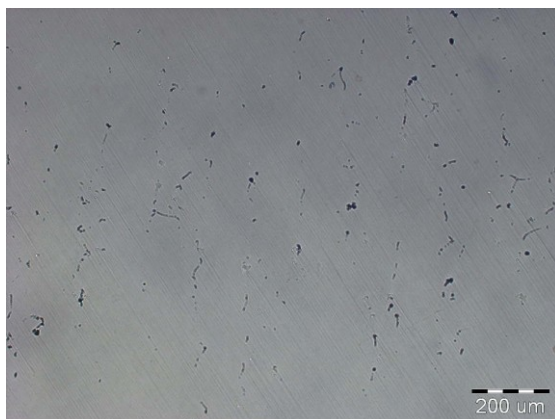
Obr. 22 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>4</sub> v litém stavu

Stejně, jako v případě předešlých vzorků, i u vzorku A<sub>4</sub> (složení slitiny IC-438) bylo provedeno pozorování makrostruktury a mikrostruktury po směrové krystalizaci, obrázek 23. Fotografie byly také pořízeny z oblasti příčného řezu T a podélného řezu L při zvětšení 100x (měřítko 200 μm) a 500x (měřítko 50 μm). Na fotografiích odpovídají světlé oblasti základní fázi o nominálním složení, ostatní fáze nejsou příliš zřetelné. Na obou fotografiích mikrostruktury jsou patrné fáze obsahující síru (žluté oblasti).

**Příčný řez**



**Podélný řez**



Obr. 23 Makrostruktura a mikrostruktura vzorku A<sub>4</sub> v usměrněném stavu

Na pozorovaných typech slitin bylo rovněž provedeno stanovení mikrotvrdosti a pórovitosti.

## 9.4. Mikrotvrдость, pórovitost

Na vzorcích ve vyleštěném stavu bylo provedeno stanovení mikrotvrđosti a pórovitosti v podélném (L) i příčném směru (T). Mikrotvrđost vzorků HV 0.05 byla měřena na mikrotvrđoměru FM-100 s řídící jednotkou FM-ARS 900, při zatížení HV 0.05 (50 gramů – 0,49 Newtonů), po dobu 7 sekund při každém vpichu. Měření bylo provedeno vždy na celé ploše vzorku s odpovídajícím krokem a pro celkové hodnocení byla použita průměrná hodnota. Pórovitost byla stanovena pomocí optického mikroskopu metodou obrazové analýzy. Měření se provedlo na několika vybraných plochách řezu a pro celkové hodnocení byla taktéž použita průměrná hodnota. Výsledné průměrné hodnoty mikrotvrđosti a pórovitosti pro litý i usměrněný stav jsou uvedeny v tabulce 10.

Tab. 10 Průměrné hodnoty mikrotvrđosti a pórovitosti pro litý a usměrněný stav

<u>Litý stav - označení slitiny</u>	Směr	Mikrotvrđost HV 0.05	Pórovitost [%]
A <sub>1</sub> L	podélný	265 ± 14	0,17 ± 0,04
A <sub>1</sub> T	příčný	261 ± 7	0,53 ± 0,43
A <sub>2</sub> L	podélný	351 ± 14	0,08 ± 0,06
A <sub>2</sub> T	příčný	349 ± 11	0,13 ± 0,11
A <sub>3</sub> L	podélný	347 ± 19	0,08 ± 0,04
A <sub>3</sub> T	příčný	342 ± 11	0,07 ± 0,02
A <sub>4</sub> L	podélný	361 ± 10	0,07 ± 0,04
A <sub>4</sub> T	příčný	356 ± 11	0,05 ± 0,02
<u>Usměrněný stav - označení slitiny</u>	Směr	Mikrotvrđost HV 0.05	Pórovitost [%]
A <sub>1</sub> L	podélný	226,69 ± 12,95	0,0439 ± 0,0207
A <sub>1</sub> T	příčný	233,39 ± 18,59	0,0558 ± 0,0240
A <sub>2</sub> L	podélný	302,43 ± 14,87	0,0502 ± 0,0391
A <sub>2</sub> T	příčný	303,27 ± 22,54	0,0500 ± 0,0167
A <sub>3</sub> L	podélný	307,22 ± 15,66	0,0585 ± 0,0379
A <sub>3</sub> T	příčný	318,90 ± 20,12	0,0420 ± 0,0146
A <sub>4</sub> L	podélný	292,41 ± 8,82	0,0733 ± 0,0267
A <sub>4</sub> T	příčný	296,69 ± 8,46	0,0513 ± 0,0175

Výsledky mikrotvrdomosti a pórovitosti u měřených vzorků nevykazují výrazné rozdíly jak v příčném, tak v podélném směru. Hodnoty mikrotvrdomosti litých vzorků A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> a A<sub>4</sub> jsou přibližně stejné, pohybují se přibližně v hodnotách 350 HV 0.05. Litý vzorek A<sub>1</sub> má nižší mikrotvrdomost než ostatní vzorky, pouze kolem 260 HV 0.05, jelikož jsou vzorky A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> a A<sub>4</sub> více legované. Hodnoty mikrotvrdomosti u směrově krystalizovaných vzorků A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> a A<sub>4</sub> se pohybují kolem hodnoty 300 HV 0.05, přičemž směrově krystalizovaný vzorek A<sub>1</sub> má nižší hodnotu mikrotvrdomosti, jako v případě litého vzorku, pouze 230 HV 0.05.

## 10. Závěr

Smyslem této práce bylo vytvořit přehled o dělení niklových slitin, především intermetalických slitin  $\text{Ni}_3\text{Al}$ , se zaměřením na jejich vlastnosti. Účelem experimentální části bylo porovnání jednotlivých struktur vybraných intermetalických slitin  $\text{Ni}_3\text{Al}$  ve stavu litém a ve stavu směrově krystalizovaném pomocí Bridgmanovy metody. Vzorky byly rovněž hodnoceny po stránce mikrotvrdosti a pórovitosti.

Porovnáním jednotlivých struktur se potvrdil pozitivní vliv směrové krystalizace na vlastnosti slitin. Struktura směrově krystalizovaných slitin je v uspořádaném stavu na rozdíl od struktury litých slitin. Směrovou krystalizací došlo taktéž k výraznému snížení počtu ředin ve slitinách. Uspořádaný stav směrově krystalizovaných slitin je nejvíce patrný u slitin s vyšším obsahem hliníku, kdy lze pozorovat pravidelně uspořádané dendrity, tvořené sítovým (tuhý roztok niklu) a fází  $\text{Ni}_3\text{Al}$ . Lze tedy říci, že chemické složení slitin má na výslednou strukturu velmi podstatný vliv, jelikož vlivem vyššího obsahu hliníku dojde k vytvoření většího počtu dendritů.

Podstatný je rovněž vliv ostatních legujících prvků, což se projevilo zejména při měření mikrotvrdosti jednotlivých typů slitin. Lité slitiny legované chromem a molybdenem ( $A_2$ ,  $A_3$  a  $A_4$ ) zaznamenaly podstatně vyšší hodnoty mikrotvrdosti než slitina legovaná pouze hliníkem ( $A_1$ ). Toto pravidlo platilo také u slitin směrově krystalizovaných, kdy více legované slitiny ( $A_2$ ,  $A_3$  a  $A_4$ ) dosáhly vyšších hodnot mikrotvrdosti v porovnání se slitinou nelegovanou chromem a molybdenem ( $A_1$ ).

Vliv směrové krystalizace na mikrotvrdost slitin nebyl výrazný. Slitiny směrově krystalizované se dokonce, v porovnání se slitinami litými, pohybovaly v nižších hodnotách. Procesem směrové krystalizace však došlo ke zlepšení pórovitosti.

Všechny slitiny byly navíc v malém množství legovány bórem a zirkoniem za účelem zvýšení pevnosti slitin. Bór ovlivňuje výrazně také tažnost slitiny.

V budoucnu by bylo vhodné zjistit vliv rychlosti směrové krystalizace na vznikající strukturu a následně pak ovlivnění fyzikálně-mechanických charakteristik.

## 11. Seznam použité literatury

- [1] NĚMEC, M., PROVAZNÍK, J. *Slévárenské slitiny neželezných kovů*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 2008. 137 s. ISBN 978-80-01-04116-1
- [2] LEŠKO, J., TRŽIL, J., ŠTARHA, R. *Anorganická chemie*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 1999. 256 s. ISBN 80-7078-692-2
- [3] Products: High-Performance Alloys. *Special Metals: The Alloy Experts* [online]. Huntington, West Virginia, USA: Special metals corporation, 2008 [cit. 2013-02-16]. Dostupné z <<http://www.specialmetals.com/products/index.php>>
- [4] MACEK, K., et al. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: ČVUT Praha, 2006. 164 s. ISBN 80-01-03513-1
- [5] Special Metals a World Leader in the development and production of high-performance alloys. *Special Metals: The Alloy Experts* [online]. Huntington, West Virginia, USA: Special metals corporation, 2008 [cit. 2013-02-17]. Dostupné z <<http://www.specialmetals.com/documents/Special%20Metals..A%20World%20Leader.pdf>>
- [6] DONACHIE, M. J., DONACHIE, S. J. *Superalloys: A Technical Guide*. 2. vyd. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 2002. 439 s. ISBN-13: 978-0-87170-749-9
- [7] SILBERNAGEL, A., et al. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. 1. vyd. Ostrava: KOVOSIL, 2011. 284 s. ISBN 978-80-903694-6-7
- [8] JONŠTA, Z., et al. *Žárupevné oceli a slitiny*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2009. 392 s. ISBN 978-80-248-2187-0
- [9] DOLEŽAL, P., POSPÍŠILOVÁ, S., PAVLÍKOVÁ, P. *Příprava a hodnocení materiálografických vzorků: Superslitiny* [online]. Brno: Ústav materiálových věd a inženýrství, Fakulta strojní, VUT Brno, 2011, poslední revize 2012 [cit. 2013 – 02 – 18]. Dostupné z <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/PHMV/index.php>>
- [10] Intermetallic Alloy Development: A Program Evaluation. *The National Academies Press* [online]. Washington, D.C.: National Academy Press, 1997, poslední revize 2013 [cit. 2013 – 02 – 21]. Dostupné z <[http://www.nap.edu/openbook.php?record\\_id=5701&page=1](http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=5701&page=1)>
- [11] DEEVI, S. C., SIKKA, V. K. Nickel and iron aluminides: an overview on properties, processing, and applications, 1995, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. *Intermetallics 4*. Great Britain: Elsevier Science Limited, 1996. s. 357 – 375.
- [12] SIKKA, V. K., et al. Advances in processing of Ni<sub>3</sub>Al-based intermetallics and applications, 2000, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. *Intermetallics 8*. Great Britain: Elsevier Science Limited, 2000. s. 1329 – 1337.



- [13] KURSA, M. Technologické a fyzikálně metalurgické charakteristiky intermetalické sloučeniny Ni<sub>3</sub>Al. In *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava: Řada hutnická*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, č. 1, 2000, roč. XLVI, čl. 1185, s. 1-122. ISBN 80-7078-871-2
- [14] WESSEL, J. K. *Handbook of advanced materials: enabling new design*. 1. vyd. Oak Ridge, Tennessee, USA: Wiley-Interscience, 2004. 645 s. ISBN 0-471-45475-3
- [15] CHANDLER, H. *Metallurgy for the Non-Metallurgist*. 1. vyd. Materials Park, Ohio, USA: ASM International, 1998. 284 s. ISBN-13: 978-0-87170-652-2
- [16] Divize přesného lití. *První Brněnská Strojírna Velká Bíteš: Specialista na točivé stroje* [online]. Velká Bíteš: První Brněnská Strojírna Velká Bíteš, a.s., 2000, poslední revize 2013 [cit. 2013 – 02 – 05]. Dostupné z <<http://www.pbsvb.cz/vyrobní-program-divize-presneho-liti>>
- [17] WARD, Wayne. Valve Materials for Extreme Applications (2). *Race engine technology, RET-MONITOR. COM* [online]. Wedmore Somerset, England: High Power Media Ltd, 2010 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z <<http://www.ret-monitor.com/articles/962/valve-materials-for-extreme-applications-2/>>
- [18] Eisenmann Germany has officially released the E9x M3 Inconel systems to the public. *Eisenmann: we are driven by sound* [online]. WordPress.com, 2011 [cit. 2013-02-05]. Dostupné z <<http://eisenmannblog.com/2011/04/14/eisenmann-germany-has-officially-released-the-e9x-m3-inconel-systems-to-the-public/>>
- [19] SIKKA, V. K., SANTELLA, M. L., ORTH, J. E. Processing and operating experience of Ni<sub>3</sub>Al-based intermetallic alloy IC-221M, 1997, Metals and Ceramics Division, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA. *Materials Science & Engineering A*. Great Britain: Elsevier Science Limited, 1997. s. 564 – 569.
- [20] KUCHAR, L., DRÁPALA, J. *Metallurgie čistých kovů: Metody rafinace čistých látek*. 1. vyd. Košice: Nadácia R. Kammela, 2000. 185 s. ISBN 80-7099-471-1